

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Fyzická geografie a geoekologie



**Bc. Dita Boszczyková**

**Stanovištne premenlivý rast smreku na hornej hranici  
lesa, Hrubý Jeseník**

Site-dependent growth of Norway spruce,  
the Hrubý Jeseník Mts.

Diplomová práce

Vedoucí závěrečné práce: Mgr. Václav Tremel, PhD.

Praha, 2011

**Prehlásenie:**

Prehlasujem, že som záverečnú prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje a literatúru. Táto práca ani jej podstatná časť nebola predložená k získaniu iného alebo rovnakého akademického titulu.

V Prahe, 21. 8. 2011

Podpis

Za cenné rady, pripomienky a trpezlivosť pri vedení mojej diplomovej práce ďakujem Mgr. Václavovi Tremlovi, PhD. Ďakujem Správe Chránenej krajinej oblasti Jeseníky za vydanie povolenia na výskumnú činnosť. Zo všetkého najviac ďakujem svojej rodine a blízkym.

This document was created using  
Smart PDF Creator  
To remove this message purchase the  
product at [www.SmartPDFCreator.com](http://www.SmartPDFCreator.com)

## ABSTRAKT

Zo stromov z dvanástich stanovísk v Hrubom Jeseníku boli postupne vytvorené letokruhové chronológie smreku obyčajného (*Picea abies*) s cieľom odhaliť variabilitu v radiálnom raste a odozve na teploty, s ohľadom na pozíciu v ekotone hornej hranice lesa a na orientáciu svahu voči slnečnému žiareniu.

Vzorky boli odoberané na svahoch s juhozápadnou a severovýchodnou orientáciou v troch výškových úrovniach v ekotone hornej hranice lesa: na hranici lesa v zapojenom poraste a v stromových skupinkách v strednej a najvyššej časti ekotonu.

Výsledky ukázali, že radiálny prírast stromov z juhozápadných svahov na hranici lesa je mierne väčší v porovnaní so stromami zo severovýchodných svahov, predovšetkým pri starších stromoch. V stromových skupinkách neboli nájdené významné rozdiely v raste smreku medzi opačne orientovanými lokalitami. Na všetkých stanoviskách bola identifikovaná zreteľná rastová depresia v 70. a 80. rokoch, ktorá je pravdepodobne výsledkom silného znečistenia a súčasne klesajúcich teplôt v tomto období. Od 90. rokov bol zaznamenaný trend zvyšujúceho sa prírastu, súvisiaci pravdepodobne s rastúcou teplotou a so zvyšujúcimi sa dusíkovými vstupmi.

Stromy z ekotonu hornej hranice lesa ukázali najsilnejší vzťah k teplotám vo vegetačnej sezóne. S nadmorskou výškou sa prejavil posun od najsilnejších korelácií v máji až auguste na hranici lesa na korelácie s júnovými a júlovými teplotami v stromových skupinkách.

Korelácie s júnovými a júlovými teplotami boli na hranici lesa výraznejšie na juhozápadných svahoch ako na svahoch severovýchodných. Stromy zo severovýchodne orientovaných stanovísk v stromových skupinkách ukázali silný vzťah aj s teplotami v januári, februári a v marci v aktuálnom roku rastu letokrhu.

## ABSTRACT

Ring - wight chronologies of Norway spruce (*Picea abies*) from the twelve sites in the Hrubý Jeseník Mountains have been developed to study radial growth variability and a response to interannual climate variation. According to the hypothesis, the spatial and temporal variability of the radial growth and the growth/climate response is caused by the site-dependent differences in both aspect and altitude.

The sampled sites have been examined at three different elevations along the treeline ecotone according to the southwest and northeast aspect: in the closed-canopy forest at the lowest part of ecotone and in the tree groups at the lower and upper part of ecotone.

The results have shown that the radial increment on the south-facing slopes has been slightly larger in the closed-canopy forest, particularly with the oldest trees. There have not been any differences in increment between the southwest and northeast slopes in the tree groups. The period of growth depression was detected during the 1970s and the 1980s at all sampled sites. This decline was probably a result of the effect of the air pollution combined with decreasing temperatures. An increasing trend in tree growth since the 1990s corresponds with the increasing temperatures and increasing nitrogen inputs at the sampled site.

On each site, there has been a positive relationship between the current-year radial growth and the mean monthly temperatures in the growing season. In the individual months, there is a shift from the strongest correlations with the May – August temperatures in the closed-canopy forest to the correlations with the June – August temperatures in the tree groups. In the closed-canopy forest, the stronger correlations with the June and July temperatures at the southwest-facing sites have been found in comparison with the northeast-facing sites. The trees from the highest parts of the treeline ecotone have also shown a strong relationship with the January – March temperatures of the current year, especially those that are located at the northeast-facing slopes.

## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| 1. ÚVOD .....  | 7  |
| 2. TEORETICKÉ ASPEKTY HORNEJ HRANICE LESA.....                                 | 11 |
| 2.1 POUŽÍVANÉ POJMY .....  | 11 |
| 2.2 HYPOTÉZY VZNIKU HORNEJ HRANICE LESA .....                                  | 12 |
| 2.3 FAKTORY OVPLYVNÚJÚCE RAST STROMOV NA HORNEJ HRANICI<br>LESA .....          | 15 |
| 2.4 VZŤAH LETOKRUHOVÝCH CHRONOLÓGIÍ K TEPLOTÁM .....                           | 17 |
| 2.5 HORNÁ HRANICA LESA V HRUBOM JESENÍKU .....                                 | 19 |
| 3. FYZICKOGEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA ...                    | 21 |
| 3.1 GEOLOGICKÉ A GEOMORFOLOGICKÉ POMERY .....                                  | 21 |
| 3.2 KLIMATICKÉ POMERY .....  | 21 |
| 3.3 HYDROLOGICKÉ POMERY .....  | 24 |
| 3.4 PÔDNE POMERY .....   | 24 |
| 3.5 BIOGEOGRAFICKÉ POMERY .....  | 25 |
| 3.6 OCHRANA PRÍRODY .....  | 25 |
| 3.7 ŠTUDOVANÉ ÚZEMIE .....   | 26 |
| 4. METÓDY .....  | 28 |
| 4.1 VÝBER STROMOV A ODBER VZORIEK .....  | 28 |
| 4.2 SPRACOVANIE VZORIEK .....  | 29 |
| 4.3 SPRACOVANIE ÚDAJOV .....   | 30 |
| 4.3.1 DATOVANIE .....  | 30 |
| 4.3.2 TVORBA RASTOVÝCH KRIVIEK.....  | 31 |
| 4.3.3 DETRENDOVANIE A TVORBA REZIDUÁLNYCH<br>CHRONOLÓGIÍ.....                  | 32 |
| 4.4 ANALÝZA ROZDIELOV V RASTE STROMOV NA SVAHOCH<br>S OPAČNOU EXPOZÍCIOU ..... | 34 |
| 4.4.1 VZŤAH MEDZI KAMBIÁLNYM A KALENDÁRNÝM VEKOM...                            | 35 |
| 4.4.2 POROVNANIE DENDROMETRICKÝCH CHARAKTERISTÍK .....                         | 35 |
| 4.5 VZŤAH MEDZI RASTOM STROMOV A TEPLOTAMI .....                               | 36 |
| 4.5.1 TEPLOTNÉ ÚDAJE .....   | 36 |
| 4.5.2 ANALÝZA HLAVNÝCH KOMPONENTOV .....                                       | 37 |
| 5. VÝSLEDKY .....  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| 5.1 ŠTATISTICKÁ CHARAKTERISTIKA LETOKRUHOVÝCH CHRONOLÓGIÍ .....  | 38 |
| 5.2 BIOLOGICKÉ RASTOVÉ KRIVKY .....  | 42 |
| 5.3 REZIDUÁLNE CHRONOLÓGIE .....   | 43 |
| 5.4 CITLIVOSŤ REZIDUÁLNYCH CHRONOLÓGIÍ NA TEPLoty .....  | 47 |
| 5.4.1 POROVNANIE TEPLÔT Z METEOROLOGICKEJ STANICE<br>PRADĚD A TEPLÔT Z CRU TS 1.2 .....  | 47 |
| 5.4.2 CELKOVÉ KORELÁCIE MEDZI REZIDUÁLNYMI<br>CHRONOLÓGIAMI A PRIEMERNÝMI TEPLOTAMI VZDUCHU<br>V MAXIMÁLNO M OŽNOM OBDOBÍ JEDNOTLIVÝCH<br>CHRONOLÓGIÍ..... | 48 |
| 5.4.3 VZŤAH RASTU STROMOV K TEPLOTÁM V SPOLOČNOM<br>OBDOBÍ ROKOV 1960-2000 (1982-2000), POKRYTOM<br>VŠETKÝMI CHRONOLÓGIAMI.....                            | 50 |
| 5.4.4 ZMENY V STABILITE VZŤAHOV MEDZI RASTOM STROMOV<br>A TEPLOTAMI.....   | 53 |
| 5.5 VARIABILITA REZIDUÁLNYCH CHRONOLÓGIÍ.....  | 55 |
| 5.6 ROZDIELY V ABSOLÚTNOM RASTE STROMOV MEDZI<br>STANOVISKAMI.....   | 58 |
| 5.6.1 VZŤAH MEDZI KAMBIÁLNYM A KALENDÁRNÝM VEKOM...  | 58 |
| 5.6.2 DENDROMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY STROMOV<br>JEDNOTLIVÝCH STANOVÍSK.....  | 63 |
| 6. DISKUSIA.....   | 66 |
| 7. ZÁVER.....  | 71 |
| 8. POUŽITÁ LITERATÚRA.....   |    |

### **Zoznam obrázkov uvedených v texte:**

Obrázok 1: Priemerné mesačné teploty vzduchu z meteorologickej stanice Praděd

Obrázok 2: Ročné hodnoty  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ

Obrázok 3: Ročné hodnoty  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ

Obrázok 4: Ročné hodnoty  $\text{O}_3$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ

Obrázok 5: Lokalizácia záujmových stanovísk

Obrázok 6: Reziduálne chronológie jednotlivých stanovísk.

Obrázok 7: Umiestnenie jednotlivých letokruhových chronológií na časovej osi.

Obrázok 8: Distribúcia všetkých čiastkových sérií

Obrázok 9: Plávajúci vyjadrený populačný signál (EPS).

Obrázok 10: Biologické rastové krivky jednotlivých stanovísk

Obrázok 11: Priemerné teploty vzduchu vo vegetačnej sezóne (V-VIII) z meteorologickej stanice Praděd (1492 m n.m.) a z Climatic research unit (CRU TS 1.2, priemerná nadmorská výška je 650 m n.m.)

Obrázok 12: Pearsonove korelácie medzi teplotnými priemerami a reziduálnymi chronológiami z hranice lesa a stromových skupiniek 2 v spoločnom období rokov 1960-2000.

Obrázok 13: Pearsonove korelácie medzi teplotnými priemerami a reziduálnymi chronológiami zo stromových skupiniek 1 v spoločnom období rokov 1982-2000.

Obrázok 14: 11-ročné plávajúce korelácie širok letokruhov a teplotných priemerov s najvyššou hodnotou celkového Pearsonovho korelačného koeficientu.

Obrázok 15: Grafické zobrazenie analýzy hlavných komponentov, vynesené sú prvé dve osi. Dve najkratšie letokruhové chronológie (pra1 a vhs1) boli vynechané, ostatné chronológie pokrývajú spoločné obdobie rokov 1964-2009.

Obrázok 16: Grafické zobrazenie analýzy hlavných komponentov, vynesené sú prvé dve osi. Použité sú všetky chronológie, pokrývajúce spoločné obdobie rokov 1982-2009

Obrázok 17: 5-ročné kľzavé priemery letokruhových širok stromov podobného veku (kambiálne vekové triedy 1-20, 21-40, 41-60 a 61-80 rokov) zo stanovísk na hranici lesa a v skupinkách stromov

Obrázok 18: 5-ročné kľzavé priemery letokruhových širok stromov podobného veku (kambiálne vekové triedy 1-20, 21-40 a 41-60 rokov) zo stanovísk v stromových skupinkách 1 a stromových skupinkách 2



### **Zoznam tabuliek uvedených v texte:**

Tabuľka 1: Charakteristika stanovísk

Tabuľka 2: Základná štatistická charakteristika letokruhových chronológií

Tabuľka 3: Pearsonove korelácie medzi jednotlivými reziduálnymi chronológiami.

Tabuľka 4: Pearsonove korelácie medzi teplotami z meteorologickej stanice Praděd (1492 m n.m.) a teplotami z Climatic research unit (CRU TS 1.2 priemerná nadmorská výška je 650 m n.m.)

Tabuľka 5: Celkové Pearsonove korelácie reziduálnych chronológií a teplotných priemerov.

Tabuľka 6: Korelácie medzi jednotlivými chronológiami použitými v analýze hlavných komponentov (vynechané sú dve najkratšie chronológie - pra1 a vhs1) v období rokov 1964-2009

Tabuľka 7: Teplotné priemery, korelujúce so skórami prvej alebo druhej osi analýzy hlavných komponentov na hladine štatistickej významnosti  $p < 0,05$

Tabuľka 8: Vybrané dendrometrické charakteristiky

## **1. ÚVOD**

Ekoton hornej hranice lesa, ktorý predstavuje prechod od hornej hranice zapojeného lesa po najvyššie lokality s výskytom stromových jedincov, je

najvýraznejším vegetačným prechodom v horských regiónoch (Plesník, 1971; Körner, 1998).

Práve v extrémnych prostrediach, ako sú najvyššie položené lesné porasty, teplota je jedným z hlavných faktorov, limitujúcim rast stromov (Fritts, 1976). Veľký význam ale majú zároveň lokálne geografické faktory, predovšetkým poloha vnútri ekotonu a orientácia svahu voči slnečnému žiareniu, ktoré ďalej ovplyvňujú napríklad teploty vzduchu a pôdy, pôsobenie vetra, dĺžku trvania snehovej pokrývky a podobne (Körner, 1998; Büntgen, 2007).

Súčasný zmeny klímy sa môžu odraziť v zmene citlivosti rastu stromov na teplotné charakteristiky. Rôzne dendroklimatické štúdie z oblasti ekotonu hornej hranice lesa ukázali, že radiálny prírast stromov je primárne ovplyvnený letnými teplotami (napr. Rolland a kol., 1998; Savva a kol., 2006; Vittoz a kol., 2008). Na druhej strane ale napríklad Büntgen a kol. (2006) zaznamenal v súčasnosti vo Švajčiarskych Alpách klesajúci trend v odozve rastu stromov na letné teploty. Podobne zmenšenú citlivosť stromov na teploty vo vysokých severných šírkach pozorovali aj Briffa a kol. (1998).

Očakáva sa, že predpokladané ďalšie klimatické zmeny budú významne ovplyvňovať lesné ekosystémy, a to predovšetkým v ekotone hornej hranice lesa. Zmena klímy môže mať vplyv na distribúciu vysokohorských rastlinných a stromových druhov, ich rozmanitosť, môže zapríčiniť fragmentáciu, zmenšovanie plôch alpínskeho bezlesia (Zapletal, 1997).

Smrek obyčajný (*Picea abies*) je jedným z najbežnejších a najvýznamnejších stromov v Európe (Savva a kol., 2006). V strednej Európe sa vyskytuje predovšetkým v horských regiónoch, významné územie tiež zaujíma v nižších oblastiach (Ellenberg, 1996).

Preto, v kontexte budúcich klimatických zmien, je potrebné pochopiť odozvu rastu smreku obyčajného (*Picea abies*) v ekotone hornej hranice lesa na rôzne rastové podmienky predovšetkým s ohľadom na rozdielnú polohu vnútri ekotonu hornej hranice lesa a rozličnú orientáciu voči slnečnému žiareniu.

Táto práca môže užitočne prispieť k rozsiahlemu existujúcemu výskumu zmien v ekotone hornej hranice lesa. Hlavným cieľom práce je teda určiť rozdielnosti v raste smreku v závislosti od polohy stanoviska. Čiastkovými cieľmi sú:

- zostaviť letokruhové chronológie smreku obyčajného (*Picea abies*), rastúceho na rozdielnych stanoviskách v ekotone hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku
- porovnať rozdiely v radiálnom raste stromov medzi stanoviskami s rozdielnymi topografickými charakteristikami
- identifikovať teplotné parametre, ktoré najvýznamnejšie ovplyvňujú premenlivosť v šírke letokruhov
- zistiť, či sa odozva radiálneho rastu stromov na teploty líši medzi rozdielnymi stanoviskami s rozdielnymi lokálnymi podmienkami

## 2. TEORETICKÉ ASPEKTY HORNEJ HRANICE LESA

### 2.1 POUŽÍVANÉ POJMY

Horná alebo alpínska hranica lesa je definovaná ako prechod lesa do bezlesia so stúpajúcou nadmorskou výškou (Körner, 1998). Táto významná prírodná hranica, vyskytujúca sa v dostatočne vysokých pohoriach, nepredstavuje v skutočnosti líniu, ale ako akákoľvek prírodná hranica je v skutočnosti prechodným pásom - ekotonom, s vlastnými dvoma okrajmi, ktoré sa podobne správajú ako prechodné pásma (Armand, 1992). Z praktických dôvodov je ale horná hranica lesa v literatúre často chápaná ako línia (Körner, 2003).

Dá sa povedať, že umiestnenie hornej hranice lesa ako línie je arbitrárne (Sveinbjörnsson, 2000), pretože závisí od interpretácie termínov „les“ a „strom“. Väčšina autorov definuje les predovšetkým podľa výšky stromov a zápoja korún stromov, prípadne podľa minimálnej plochy zapojeného lesa (pokryvnosť). Podrobné prehľady konkrétnych používaných parametrov rôznych autorov spracoval napríklad Plesník (1971) alebo Holtmeier (2003).

Plesník (1971) ako základné parametre lesa uvádza 50 % pokryvnosť, plochu 10 árov a minimálnu výšku stromov 8 m. Jeník a Lokvenc (1962) rovnako uvádzajú ako kritérium 50 % pokryvnosť, minimálnu výšku stromov ale iba 5 m a minimálnu plochu 1 ár. Körner (1999, 2003) odvodzuje minimálnu výšku stromu od výšky snehovej pokrývky v zime – strom musí byť vyšší, ako je priemerná výška snehovej pokrývky.

Z hľadiska ekotonového poňatia (pre túto prácu podstatného) je dolný okraj ekotonu stanovený ako línia, na ktorej sa začína súvislý les rozpadáť (Tremel, 2007). Horný okraj ekotonu je stanovený ako horná hranica výskytu stromových druhov (Körner, 1999), prípadne ako horná hranica výskytu vzpriamených stromov (Jeník a Lokvenc, 1962).

Napriek tomu, že ekoton hornej hranice lesa je pravdepodobne jedným z najznámejších a najviac študovaných vegetačných prechodov, prejavuje sa v literatúre nejednotnosť nie len v používaní základných pojmov, dotýkajúcich sa predmetnej problematiky, ale aj v samotnom pomenovaní tohto fenoménu. Jeník a Lokvenc (1962) používajú termín „alpínska hranica lesa“. Plesník (1971) sa prikláňa k pomenovaniu „horná hranica lesa“, ktorý je používaný aj v tejto práci (v zmysle ekotonu hornej hranice lesa).

## 2.2 HYPOTÉZY VZNIKU HORNEJ HRANICE LESA

Vznik a poloha fenoménu hornej hranice lesa môže byť chápaná ako dôsledok konfrontácie biotických a abiotických faktorov, v ktorých sa klimatické podmienky stávajú postupne stále menej a menej priaznivými a spoločne s mierou odolnosti stromov určujú hornú hranicu ich rastu (Wieser, 1997).

Dôležité je rozlišovať, či sa jedná o všeobecné, globálne platné zákonitosti, alebo o modulatívne, na lokálnej úrovni pôsobiace činitele.

Hlavnou, všeobecnou, na globálnej úrovni pôsobiacou príčinou existencie hornej hranice lesa je nepriaznivá teplotná bilancia zväčšujúca sa so stúpajúcou nadmorskou výškou (Wieser, 1997). Názory na hlavnú fyziologickú príčinu zastavenia rastu stromov sa ale líšia.

Jednou z najstarších hypotéz je, že pomerne krátka a studená vegetačná doba na hornej hranici lesa je nedostatočná pre úplný vývin kutikuly ihlíc, následkom čoho sa stromy v zime a na jar, keď je pôda ešte zamrznutá, stávajú vysoko citlivé na vysušenie (Tranquillini, 1979). Ďalšie výskumy a zistenia ale nepotvrdili platnosť tejto hypotézy na globálnej úrovni. Stres v dôsledku mrazového vysušenia môže byť problematický pre mladé stromy nad hornou hranicou lesa v temperátnych oblastiach, nemôže ale vysvetliť fenomén hornej hranice lesa ako taký (Körner, 1998,1999).

Körner (1998) popísal a zhodnotil 5 základných hypotéz, týkajúcich sa limitovania polohy hornej hranice lesa, ktoré zahŕňajú:

- stres spôsobený mrazovým vysúšaním a opakovaným poškodzovaním mrazom, prípadne fototoxickými účinkami po mrazovom oslabení rastu stromu
- mechanické poškodenie stromov vplyvom vetra, obrušovaním čiastočkami ľadu a snehovými lavínami, poškodzovanie bylinožravcami a hubovými patogénmi môže spôsobiť stratu rovnakého, prípadne väčšieho množstva biomasy, ako je strom schopný nahradiť v období svojho rastu
- reprodukčné obmedzenia – zhoršené podmienky pre tvorbu peľu, pre dozrievanie a klíčenie semien, ujetie sa semenáčikov
- nedostatočná fotosyntetická aktivita (hypotéza zápornej uhlíkovej bilancie) – príjem uhlíka (alebo pomer medzi príjmom a výdajom) nie je dostatočný pre podporu života a rast stromu

- obmedzenia rastu – nedostatočné zabudovanie asimilátov, potrebných pre rast a obnovu stromov do rastlinných pletív, nezávisle od zásoby týchto materiálov v organizme stromu

Körner (1998) usudzuje, že najmä nedostatočné zabudovanie asimilátov a nedostatočná fotosyntetická aktivita negatívne ovplyvňujú rast stromov, ktoré sú potom náchylnejšie na mrazové vysušenie a mechanické rozrušovanie a ich reprodukcia je obmedzená.

Hypotézu zápornej uhlíkovej bilancie nepodporuje zistenie, že straty uhlíka dýchaním v období, kedy je fotosyntéza neaktívna (v dôsledku nedostatku slnečného žiarenia v noci a nízkych teplôt v zimných mesiacoch) sú nevýznamné (Körner, 1998, 1999). Straty uhlíka v dôsledku dýchania počas zimných mesiacov môže strom nahradiť počas jediného dňa vo vegetačnej sezóne (Wieser, 1997) a teda k zvýšeným respiračným stratám všeobecne nedochádza. Hypotézu nedostatočnej uhlíkovej bilancie nepodporuje ani zistenie, že množstvo fotosyntetických asimilátov v pletivách stromov je dostatočné (Hoch a kol., 2002).

Produkcia semien je v podmienkach na hornej hranici lesa pomerne nízka a premenlivá (Tranquillini, 1979). Zároveň sa s nadmorskou výškou, v dôsledku nedostatku vhodných miest a konkurencie s inými rastlinnými druhmi, zhoršujú aj podmienky pre vyklíčenie semien a ich uchytenie (Tranquillini, 1979; Holtmeier, 2003). Stromy sa so zvyšujúcou nadmorskou výškou rozmnožujú viac vegetatívnym spôsobom, teplotné obmedzenia vegetatívneho rozmnožovania sú minimálne (Holtmeier, 2003).

V súčasnosti akceptovanou je hypotéza obmedzenia rastu (growth limitation), ktorej základným predpokladom je nedostatočné zabudovanie asimilátov fotosyntézy v dôsledku nízkych teplôt a teda nevyhnutne nasledujúce zastavenie rastu buniek a formovania rastlinných pletív (Körner, 1998, 1999).

Skutočnosť, že obmedzenie rastu je hlavnou príčinou vzniku hornej hranice lesa podporuje názor, že teplota vo vegetačnej dobe je hlavným faktorom kontrolujúcim rast stromov (Körner a Paulsen, 2004). Körner (2003), Körner a Paulsen (2004) stanovujú ako limitné pre rast stromov hodnoty priemernej teploty vzduchu vo vegetačnej dobe v rozmedzí od 5,5 do 7,5 °C (nezávisle na dĺžke trvania vegetačnej sezóny). Zároveň ale rast stromov nie je obmedzený iba teplotou vzduchu – Körner a Paulsen (2004) a Körner (2007) uvádzajú ako pre rast stromov zásadný zároveň rozsah teplôt pôdy (10 cm pod povrchom) vo vegetačnej dobe v rozmedzí  $6,7^{\circ}\text{C} \pm 0,8 \text{ SD}$ .



Napriek tomu, že Körnerova hypotéza obmedzenia rastu (1998) je v súlade s výraznými koreláciami stromov z vysokých výšok na júlové teploty (ktoré sú často identifikované ako veľmi významné pre rast stromov a tiež výška hornej hranice je často spájaná s júlovými teplotami), na globálnej úrovni nie je stále úplne jasné, aké procesy limitujú rast stromov na hornej hranici lesa (Grace a kol., 2002).

Ďalšou, v súčasnosti diskutovanou teóriou, vysvetľujúcou vznik hornej hranice lesa je hypotéza obmedzenia zdrojov (source limitation). Podľa Sveinbjörnssona (2000) sa so stúpajúcou nadmorskou výškou rovnako ako aj so stúpajúcou zemepisnou šírkou zvyšuje riziko a intenzita extrémnych udalostí (vplyv snehu a lavín, biotické faktory a iné). Materiálová bilancia stromu sa stáva slabšou (prejavom je napr. stenčenie kutikuly) a znášateľnosť stromov sa znižuje. To môže viesť k podmienkam, kedy tvorba biomasy nemôže nahradiť straty. Hlavnými živinami, ktoré limitujú rast stromu sú podľa Sveinbjörnssona (2000) dusík a cukry.

Fajardo a kol. (2011) skúmali v Andách koncentráciu neštruktúrálnych uhl'ohydrátov v pletivách stromov pri hranici lesa, ktoré sa hromadia vždy keď rast stromu je obmedzený viac ako fotosyntéza. Nárast koncentrácie uhl'ohydrátov s nadmorskou výškou podporil hypotézu obmedzenia rastu oproti hypotéze uhlíkového obmedzenia (carbon-limitation hypothesis).

Podľa Sveinbjörnssona (2000) však môže byť vysoká koncentrácia uhl'ohydrátov v pletivách stromov z vysokých výšok interpretovaná ako prispôsobenie sa stromu na vysoké riziko straty tkanív v extrémnych environmentálnych podmienkach pri hornej hranici lesa.

## 2.3 FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE RAST STROMOV NA HORNEJ HRANICI LESA

Okrem globálne platných teplotných limitov sa na raste stromov na hornej hranici lesa podieľajú aj ďalšie faktory modulatívneho charakteru, ktoré v lokálnom merítku môžu mať aj výraznejší účinok na polohu a charakter hornej hranice lesa ako samotné teplotné limity (Holtmeier, 2003). Vplyv lokálnych faktorov na hornú hranicu lesa sa často prelína, pôsobenie jedného môže uľahčiť vplyv ďalších a podobne.

Jedným zo zásadných faktorov, určujúcich polohu hornej hranice lesa je charakter reliéfu, vplývajúci nielen na lokálne klimatické a edafické podmienky ale zároveň pôsobiaci ako kľúčový činiteľ všetkých ďalších faktorov.

Sklon svahov a orientácia svahov voči slnečnému žiareniu je jedným z najdôležitejších prejavov reliéfu vo vysokých pohoriach. V dostatočne humídnych temperátnych pohoriach prebieha horná hranica lesa vyššie na výhodne južne orientovaných svahoch, naopak v suchých horských regiónoch sú južne orientované svahy spojené s poklesom hornej hranice lesa (Holtmeier, 2003). Strmé svahy sú späté s rýchlejšími svahovými procesmi ako sú lavíny, mury, zosuvy a podobne (Jeník a Lokvenc, 1962; Holtmeier, 2003), čím významne ovplyvňujú nielen polohu, ale aj charakter a vzhľad hornej hranice lesa.

Podľa Oberhubera (2004) sú hlavnými faktormi, ovplyvňujúcimi rast stromov v zime mráz, mrazové vysušenie, zmraznutie pôdy a predĺženie snehovej pokrývky. Mráz môže poškodiť nové výhonky a redukovať rast stromov (Heikkinen a kol., 1995).

Skôr spomínané mrazové vysušenie môže najmä v temperátnych pohoriach pôsobiť na rast stromov ako významný stresový faktor najmä začiatkom a koncom zimy, kedy pôsobením zvýšených teplôt vzduchu sa zvyšuje transpirácia stromov. Pri stále zmraznutej pôde dochádza potom k stratám vody, ktoré strom nie je schopný nahradiť (Tranquillini, 1979).

Vietor hrá významnú úlohu pri formovaní tvaru stromov, ktorý sa zvyčajne v ekotone hornej hranice lesa podstatne odlišuje od tvaru stromov v zapojenom lese. Mnoho stromových druhov, a ihličnany predovšetkým, nadobúda v polohách ovplyvnených silnými vetrami charakteristické zástavovité formy (Sveinbjörnsson, 2000). Vietor tiež ovplyvňuje miestne teplotné, vlhkostné a snehové pomery a zároveň spôsobuje mechanické poškodenie priamo svojim pôsobením (napr. vývraty, polomy) alebo obrusovaním asimilačných orgánov čiastočkami snehu, ľadu (Jeník a Lokvenc, 1962; Plesník, 1971). Významné je aj fyziologické pôsobenie, kedy silné vetry oslabujú



fotosyntézu a umocňujú vplyv mrazového vysušenia (zosilňujú fyziologické sucho) (Holtmeier, 2009).

Sneh ako faktor ovplyvňujúci hornú hranicu lesa môže na jednej strane ochrániť stromy pred negatívnymi vplyvmi vetra, zimným vysušením a vetrom podmieneným obrusovaním častí stromu, na strane druhej stojí deštruktívne pôsobenie plazivého snehu a snehových lavín (Heikkinen a kol., 1995). Lavíny sa uplatňujú hlavne v detailnom priebehu hornej hranice lesa (Plesník, 1971).

Pôdy v oblasti ekotonu hornej hranice lesa sú všeobecne plytké, s nedostatkom jemnozeme a nedostatkom živín (Plesník, 1971). Sveinbjörnsson (2000) tvrdí, že štruktúra a charakter pôdy sa s gradientom nadmorskej výšky mení, hrúbka organickej vrstvy sa môže zmenšovať, ale aj zväčšovať.

Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim rast stromov v ekotone hornej hranice lesa je kompetícia s ostatnými rastlinnými druhmi a trávami, ktoré zhoršujú podmienky pre úspešné uchytenie a vyklíčenie semien (Tranquillini, 1979). V európskych pohoriach je často významným konkurentom v oblasti hranice lesa kosodrevina (*Pinus mugo*), ktorá na jednej strane semenáčky chráni, na strane druhej ale zhoršuje svetelné podmienky a možnosti získania živín (Dullinger a kol., 2005).

Biologickými činiteľmi ovplyvňujúcimi hranicu lesa sú živočíchy, negatívne pôsobiace najmä ohrýzaním kôry kmeňov, pukov a ihlíc (Plesník, 1971). Vplyv rastlinných chorôb a rôznych škodcov môže mať výrazne negatívnejší účinok na stromy, ktorých zdravotný stav je oslabený napríklad znečistením (Heikkinen a kol., 1995). Pozitívne, pre rast stromu potrebné sú mykorhízne väzby (Holtmeier, 2003).

K výrazným činiteľom, ovplyvňujúcim hornú hranicu lesa patrí človek. Antropogénne vplyvy môžu byť priame (pasierstvo, odlesňovanie, turizmus) alebo nepriame (chemické znečistenie ovzdušia, pôdy, vody), prejavujúce sa predovšetkým posledných niekoľko desaťročí (Plesník, 1971; Heikkinen a kol., 1995).

## 2.4 VZŤAH LETOKRUHOVÝCH CHRONOLÓGIÍ K TEPLOTÁM

V extrémnych environmentálnych podmienkach, ako sú vysoko položené lokality horských regiónov, klíma je jedným z hlavných faktorov, limitujúcich rast stromov (Fritts, 1976; Savva a kol., 2006).

Je známe, že premenlivosť v šírkach letokruhov stromov z vysokých nadmorských výškok odráža predovšetkým teplotné vplyvy (Schweingruber, 1996; Frank a Esper, 2005).

Európske letokruhové chronológie sú v poslednej dobe často porovnávané s klimatickými premennými, predovšetkým s teplotami. Takto zamerané výskumy prebehli najmä v Alpách (napr. Rolland a kol., 1998; Frank a Esper, 2005; Büntgen a kol., 2006, 2008) a v Západných Karpatoch (napr. Savva a kol., 2006; Büntgen a kol., 2007).

Pomerne malá pozornosť bola ale doposiaľ venovaná rozdielom v premenlivej odozve rastu stromov na teploty, s ohľadom na rozdielnu orientáciu lokality a pozíciu v rámci ekotonu hornej hranice lesa. Napriek tomu niekoľko štúdií ukázalo, že reakcia stromov na jednotlivé klimatické veličiny sa líši v závislosti od lokálnych podmienok (napr. Oberhuber, 2004; Vittoz a kol., 2008; Moser, 2010).

Podľa Oberhubera (2004) práve nadmorská výška a orientácia svahu (ktoré ovplyvňujú teplotu vzduchu a pôdy, ako výsledok premenlivej insolácie, vystaveniu vetrov a akumulácie snehu) sú kritickými faktormi ovplyvňujúcimi radiálny rast stromov na rozdielnych stanoviskách.

Výsledky štúdií všetkých vyššie uvedených autorov potvrdzujú všeobecné pravidlo, že na rast stromov vo vysokých nadmorských výškach má dominantný vplyv teplota v rastovej sezóne (Körner, 1998; Holtmeier, 2000; Körner a Paulsen, 2004). Vplyv jednotlivých letných mesiacov na rast stromov sa ale medzi študovanými lokalitami odlišuje:

Savva a kol. (2006) sledovali odozvu rastu smreku na teploty v Tatrách. Pozitívny vzťah autori objavili medzi aktuálnym radiálnym prírastom stromov a priemernými teplotami v marci, apríli, júni a júli, avšak s rastúcou nadmorskou výškou sila korelácií klesala v období marca a apríla a naopak stúpala v prípade korelácií s júnovou a júlovou priemernou teplotou.

Vplyv nadmorskej výšky na rast stromov v ekotone hornej hranice lesa zaznamenal aj Moser (2010), ktorý monitoroval rastovú sezónu smrekovca opadavého (*Larix decidua*) vo Švajčiarskych Alpách. Formovanie letokruhov trvalo od polovice

mája do konca októbra, dĺžka trvania rastovej sezóny klesala s nadmorskou výškou, pričom sa posúval nástup rastovej sezóny, jej koniec ale ukázal minimálnu súvislosť so zmenou nadmorskej výšky.

Pozitívny vplyv letných teplôt na radiálny rast borovice limby vo Švajčiarskych Alpách potvrdil aj Vittoz a kol. (2008), najvýraznejšie boli korelácie s júlovou teplotou. Podobne Frank a Esper (2005) zaznamenali v Alpách výrazný vplyv najmä júnových a júlových teplôt, rovnako ako Büntgen a kol. (2007) v Tatrách.

Oberhuber (2004) sa zaoberal rozdielmi v raste borovice limby (*Pinus cembra*) v závislosti od expozície a od rozdielnej polohy v rámci ekotonu hornej hranice lesa v suchom regióne Centrálnych Rakúskych Álp. Radiálny rast stromov bol pozitívne korelovaný s júlovou teplotou, s miernymi teplotami v jeseni predchádzajúceho roku a vysokými zrážkami v zime. Stromy západných svahov ukázali v dôsledku pôsobenia silných vetrov najslabší vzťah ku klimatickým veličinám (Oberhuber, 2004).

Kladné korelácie s teplotou predchádzajúcej jesene ukazujú, že teplý september a október predošlého roku umožňujú dostatočné vytvorenie zásob uhlíka, udržiavajú pôdu dlhšie nezmrznutú (čo podporuje mykorhízny rast koreňov) a priaznivo pôsobia na dotvorenie ihličia. Tým prispievajú k ochrane pred škodlivými vplyvmi zimného stresu (Oberhuber, 2004).

Pre úplné dotvorenie kutikuly ihličnanov je potrebná dostatočne dlhá rastová sezóna a teplé leto (Tranquillini, 1979). V prípade, že strom nie je chránený snehovou pokrývkou, neúplne dotvorené pletivá môžu byť v zime silno poškodené mrazom, vysušením a abráziou (Oberhuber, 2004).

Význam teplôt predchádzajúcej jesene na radiálny rast stromov bol potvrdený aj v Tatrách (Savva a kol., 2006; Büntgen a kol., 2007) a v Alpách (Frank a Esper, 2005).

Büntgen a kol. (2006) skúmal vzťah teploty a rastu smreka obyčajného (*Picea abies*) vo vysokých nadmorských výškach v troch švajčiarskych subalpínskych údoliach. Výsledné zákonitosti v odozve rastu stromov na klimatické premenné indikujú interakciu medzi letnými teplotami (máj, júl) aktuálneho roku a zrážkami v auguste a septembri v predchádzajúcom roku. Teploty v období jún – august boli rozhodujúcimi pre rast stromov pred rokom 1900, odvtedy sa citlivosť presúva na májové a júlové teploty v spolupôsobení augustových zrážok. Plávajúce kĺzavé korelácie medzi radiálnymi prírastmi a letnými teplotami ale v súčasnosti ukázali klesajúci trend v citlivosti na teploty. Iba korelácie s májovými teplotami ukázali stúpajúci trend a teda ukazujú možný posun vegetačnej doby (Büntgen a kol., 2006).

## 2.5 HORNÁ HRANICA LESA V HRUBOM JESENÍKU

Hornú hranicu lesa v Hrubom Jeseníku ovplyvňujú predovšetkým klimatické faktory (najvyššie polohy Hrubého Jeseníku majú extrémnu klímu odpovedajúcu vysokoalpínskym až subarktickým podmienkam), geodynamické faktory a dlhodobá činnosť človeka (Banaš a kol., 2001).

Oblasti alpínskeho bezlesia sa v Hrubom Jeseníku vyskytujú v šiestich oddelených oblastiach: najväčšou je oblasť Vysoká Hole (1464 m n.m.) – Pecný (1334 m n.m.), ďalej oblasť Pradědu (1492 m n.m.), oblasť Malý Děd (1355 m n.m.), Mravenečník (1343 m n.m.), Červená hora (1337 m n.m.), Keprník (1423 m n.m.) a Šerák (1351 m n.m.) (Treml a Banaš, 2000).

Pre porovnanie sa podľa Alblovej (1970) a Deylovej-Skočpodalovej (1984) v Hrubom Jeseníku vyskytujú iba tri prirodzené enklávy hornej hranice lesa: vrchol Pradědu, úsek Petrovy kameny – Pec a vrchol Keprníku. Šerák, Mravenečník, Červenú horu a Malý Děd autorky považujú za umelo odlesnené.

Priemerná výška hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku je 1310 m n.m., maximálnu výšku dosahuje na severozápadnom svahu Pradědu (1405 m n.m.), minimálnu výšku na svahu Velkej kotliny (1100 m n.m.) (Treml a Banaš, 2000).

Prirodzená absencia konkurenčných edifikátorov, napr. kosodreviny (*Pinus mugo*) a jelše zelenej (*Duschekia alnobetula*) vytvára vhodné podmienky pre výskyt alpínskych a subalpínskych ekosystémov, s množstvom rastlinných aj živočíšnych endemitov (Jeník, 1973).

Nepřítomnosť autochtónnej kosodreviny (*Pinus mugo*) dodáva ekotonu hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku charakteristickú mozaikovitú štruktúru, husté skupinky stromov vystupujú do pomerne vysokých nadmorských výšok (Bureš, 1976; Plesník, 1984).

Banaš a kol. (2001) uvádzajú ako doklady prirodzenosti bezlesia v Hrubom Jeseníku peľové analýzy, prítomnosť aktívnych aj fosílnych geomorfologických tvarov (ktoré sa svojou aktivitou a zachovaním viažu na bezlesie), primárne rastlinné a živočíšne spoločenstvá alpínskeho stupňa a tiež historické prieskumy.

Najvyššie polohy Hrubého Jeseníku začal človek vo väčšej miere hospodársky využívať približne na prelome 17. a 18. storočia (Hošek, 1973). V tomto období sa na holiach začal pásť dobytok a ovce, miestami sa plochy využívali na travárenie, čo ešte nemalo výraznejší vplyv na porasty hornej hranice lesa (Bureš, 1976). Koncom 18. storočia sa v blízkosti hornej hranice lesa začalo ťažiť drevo (využíval sa aj holosečný

spôsob), dôsledky sa najviac prejavili na východných svahoch Pradědu a Vysokej Hole (Hošek, 1973; Bureš, 1976). Od polovice 19. storočia bola ťažba v najvyšších oblastiach postupne obmedzovaná (Hošek, 1973; Bureš, 1976) a od 80. rokov 19. storočia sú zaznamenané pokusy o umelé zvýšenie hornej hranice lesa až na horský hrebeň.

Hlavnou hospodárskou drevinou bol smrek obyčajný (*Picea abies*), charakteristický ľahkým zmladzovaním (Hošek, 1973). V 19. a 20. storočí prebehli úspešné výsadby kosodreviny (*Pinus mugo*), ktorá postupne expandovala na úkor reliktných biotopov, vrátane rozvoľnených smrekových porastov na hornej hranici lesa (Zeidler a kol., 2010).

Už od polovice 70. rokov 20. storočia sa v najvyšších polohách Hrubého Jeseníku začal prejavovať vplyv znečistenia ovzdušia. Škody spôsobené priemyselnými exhaláciami sa výrazne podpísali na poškodení lesných porastov. K rozsiahlemu poškodeniu smrekového ihličia došlo po prudkom poklese teplôt na prelome rokov 1978 a 1979. V rokoch 1981 – 1983 bol zaznamenaný prudký nárast poškodenia, čo sa prejavilo vysychaním jednotlivých stromov až odumieraním a rozpadom celých porastov. Po rokoch 1983 – 1984 nasledovali roky bez výrazných klimatických výkyvov, čím sa rýchly vývoj poškodenia spomalil. V 90. rokoch sa situácia čiastočne zlepšila (odsírenie hnedouhoľných baní v Severných Čechách) (Zapletal, 1997).

Pôsobenie kyslej depozície malo výrazný vplyv na lesnú pôdu, dochádza k vážnemu porušeniu rovnováhy vo výžive porastov, v hrebeňových polohách bolo zaznamenané silné okyslenie pôd (Zapletal, 1997).

### **3. FYZICKOGEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA**

#### **3.1 GEOLOGICKÉ A GEOMORFOLOGICKÉ POMERY**

Podľa Chlupáča a kol. (2002) patrí Hrubý Jeseník do moravskoslezskej oblasti Českého masívu. Najväčšie horninové zastúpenie majú granitoidy alebo metamorfované horniny paleozoického až proterozoického veku (Chlupáč a kol., 2002).

Tektonické pohyby v kriede a kenozoiku spôsobili výzdvih hrástí v období saxónskej fázy alpínskej orogenézy a určili priebeh údolnej siete (Kunský, 1967). Hrubojesenické zlomy majú SZ – JV a SV – JZ smer (Mísař, 1965 in Tremml, 2007).

Základným rysom reliéfu Hrubého Jeseníku je jeho stupňovitá stavba, je tvorený vysokovýzdvihnutými zvyškami zarovnaných povrchov (Kunský, 1967; Demek, 1973). Závery dolín boli premodelované glaciálnymi a nivačnými procesmi (Prosová, 1973).

Na hrebeňoch Hrubého Jeseníku sa nachádzajú zachované polygonálne pôdy (Vysoká Hole, Máj). Na Keprníku sú vyvinuté thufury, na Břidličnej hore sa vyskytujú kamenné polygóny a brázené pôdy (Banaš a kol., 2001).

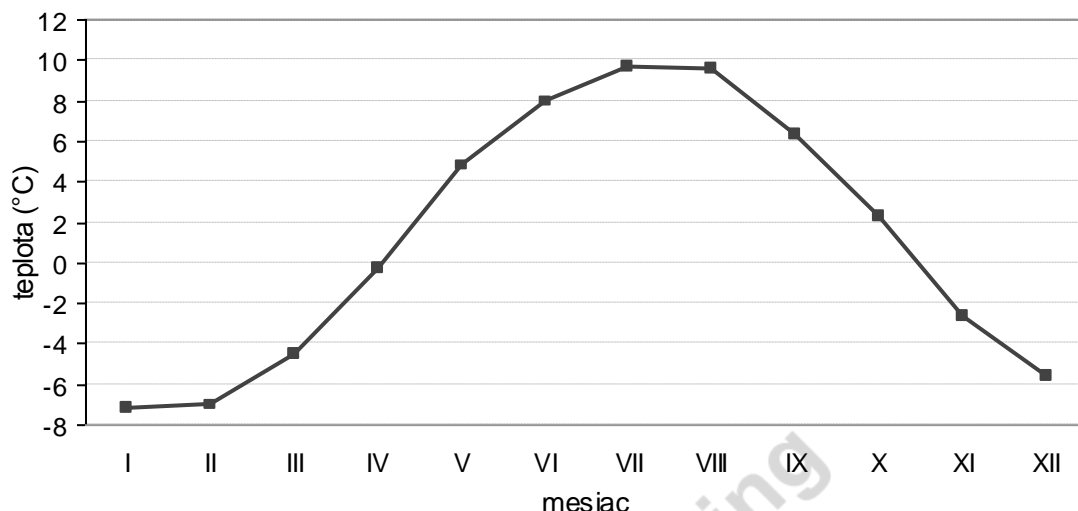
#### **3.2 KLIMATICKÉ POMERY**

Podľa Quitta (1971) patria najvyššie položené časti Hrubého Jeseníku do chladnej oblasti (CH4), pre ktorú je charakteristické veľmi krátke, chladné a vlhké leto. Prechodné obdobie je veľmi dlhé s chladnou jarou a mierne chladnou jeseňou. Zima je veľmi dlhá a veľmi chladná, vlhká s veľmi dlhým trvaním snehovej pokrývky.

Hrubý Jeseník tvorí rozhranie oceánskeho a kontinentálneho podnebia. Priemerná ročná teplota vzduchu je 1,1°C, najteplejším mesiacom je júl s priemernou teplotou 9,7°C, najchladnejším mesiacom je január s priemernou teplotou -7,5°C. Mrazivé dni (pod -0,1°C) sa vyskytujú priemerne v 168 dňoch, od novembra do marca sa vyskytujú dni arktické, letné dni (nad 25°C) sa vyskytujú iba výnimočne (Lednický, 1985).



Obrázok 1: Priemerné mesačné teploty vzduchu z meteorologickej stanice Praděd (1492 m n.m.) v období rokov 1947-1996. Zdroj: ČHMÚ



Priemerná mesačná oblačnosť dosahuje najvyššie hodnoty (83 %) v novembri, najnižšie hodnoty v auguste a septembri (68 %). Vysoké hodnoty oblačnosti majú negatívny vplyv na dĺžku slnečného svitu, v ročnom priemere tvoria jasné dni iba 8 %, častá je hmla (80 % dní v roku) (Lednický, 1972a).

Najčastejší výskyt vo všetkých mesiacoch aj v celom roku majú západné a severozápadné vzdušné prúdy (Lednický, 1972b).

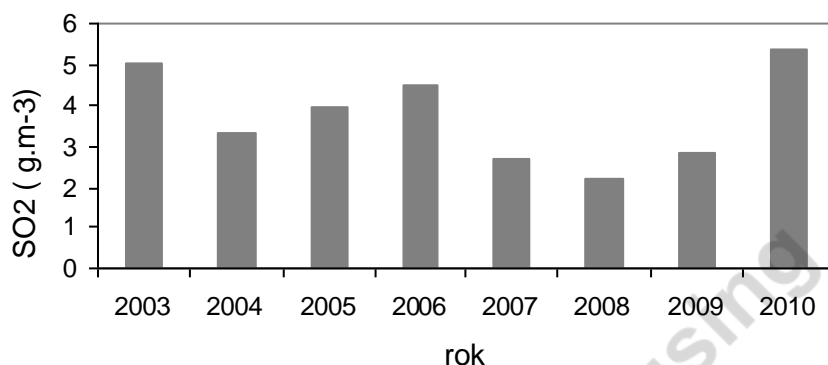
Územie výrazne ovplyvňuje lokálne prúdenie – tzv. anemo-orografický systém (Jeník, 1961). Niektoré údolia v Hrubom Jeseníku pôsobia na prevládajúce západné vetry ako zberné korytá – vo svojom profile sústreďujú vzdušné prúdy a vedú ich v smere svojej pozdĺžnej osi k hrebeňovým častiam a náhorným plošinám (zároveň sa zvyšuje rýchlosť prúdenia), takže sa vytvára trvalé a usmernené veterné prúdenie, ktoré po prechode cez horný okraj kotlín vytvára zložité záveterné turbulentné javy (Jeník, 1961). V Hrubom Jeseníku sú najvýznamnejšími anemo-orografické systémy Divokej Desnej (ústredný jesenický), Merty (južný jesenický), Hučivej Desnej (červenohorský) a Brannej (severný jesenický) (Jeník, 1961).

Ročný priemer zrážok je približne 1200 mm, najvyššie hodnoty priemerných mesačných zrážok sú v letných mesiacoch (júl, 178 mm), najmenej zrážok pripadá na október (67 mm). Zrážky vo forme snehu sa vyskytujú po celý rok, snehová pokrývka je súvislá priemerne 167 dní (Tejnský a Tejnská, 1972).

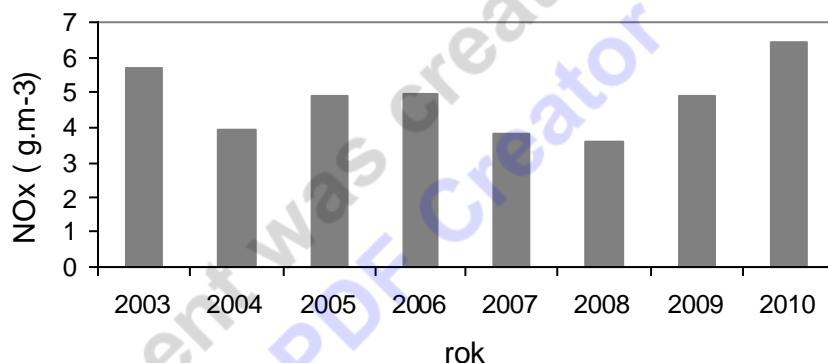
Ročné hodnoty koncentrácií SO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> v období od roku 2003 do roku 2010 (obrázok 2 a 3) ukazujú, že imisný limit pre ochranu ekosystému nebol prekročený

v žiadnom roku zaznamenaného obdobia ( $\text{SO}_2$  :  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$ ,  $\text{NO}_x$  :  $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ ). Hodnoty  $\text{SO}_2$  od roku 2008 opäťovne stúpajú, hodnoty koncentrácií oxidov dusíka rovnako stúpajú od roku 2008. K prekročeniu imisného limitu pri ozóne ( $18\,000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$ ) došlo v rokoch 2003, 2005 a 2006 (obrázok 4).

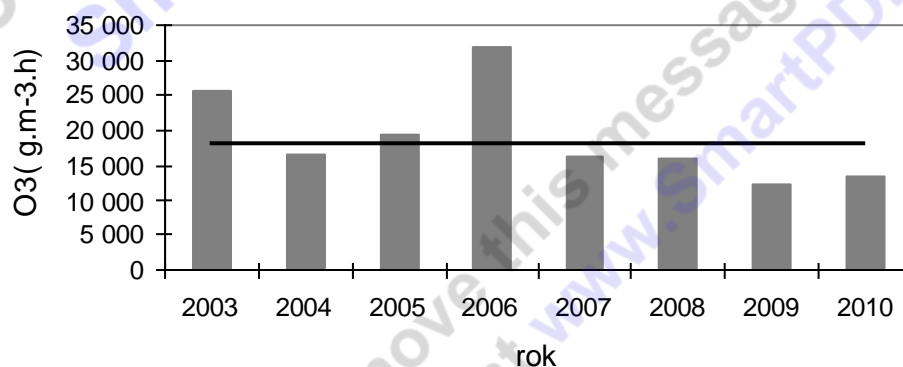
Obrázok 2: Ročné hodnoty  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ



Obrázok 3: Ročné hodnoty  $\text{NO}_x$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ



Obrázok 4: Ročné hodnoty  $\text{O}_3$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$ ), stanica Jeseník. Zdroj: ČHMÚ





### 3.3 HYDROLOGICKÉ POMERY

Hrebeň Hrubého Jeseníku je súčasťou hlavného európskeho rozvodia. Vody zo severnej a východnej časti sú odvodňované do Baltského mora (rieky Bělá, Opava, Moravica). Západné časti Hrubého Jeseníku sú odvodňované riekami Branná, Desná a Oskava do Moravy, do Dunaja a Čierneho mora (Kalus a kol., 1972).

Vodné toky v horských oblastiach sa vyznačujú prudkým spádom a rýchlym kolísaním vodnosti (Kalus a kol., 1972).

### 3.4 PÔDNE POMERY

V nižších lokalitách Hrubého Jeseníku je vyvinutá sústava nasýtených a nenасыtených kambizemí, v závislosti od charakteru substrátu a od foriem reliéfu (rozhodujúce je množstvo a charakter svahovín) vytvárajú niekoľko subtypov a variet: kambizeme mezotrofné, kambizeme oligotrofné až podzolované (Pelíšek, 1972).

Kambizeme sú v Hrubom Jeseníku pomerne rozšírené, pokrývajú súvislé pásmo v nadmorských výškach asi 500-1100 m. Sú to pôdy pomerne ľahké, s rôznou štrkovitosťou, dobre prevzdušnené a celkovo s dobrým vodným režimom počas vegetačnej doby (Pelíšek, 1972).

V širšej oblasti Hrubého Jeseníku od nížin do vrcholových horských oblastí je výrazne vyvinutá výšková pôdna, resp. klimaticko – pôdna pásmovitosť. Jednotlivé klimaticko – pôdne výškové pásma majú výrazné ekologicky dôležité bioklimatické, fyzikálne, chemické a biochemické vlastnosti (Pelíšek, 1972).

Pomerne veľké zastúpenie vo vyšších polohách majú horské podzoly, vznikajúce na kyslých horninách v humídnej klíme. Významné sú kambizemné podzoly, plytké až stredne hlboké, s mocnou humusovou vrstvou, silno kyslé, s prevažujúcou humusovou formou mor. Humusovo – železité podzoly, miestami zamokrené a zrašelinelé sú typické v najvyšších polohách (asi 1050 m n.m.).

Rankre, kambizeme a kryptopodzoly rankrové sú charakteristické pre kamenité a skalnaté lokality. Nevyvinuté pôdy - litozeme sú typické pre strmé zrázy so skalnými výstupmi.

Kambizeme a kryptopodzoly pseudoglejové, pseudogleje a gleje sa vyskytujú pozdĺž tokov v zníženinách a na vlhkých stanoviskách.

Organozem je zastúpená v menšej miere na rašeliniskách Rejvíc a Skřítek, v niektorých horských sedlách a v terénnych zníženinách hrebeňovej oblasti. Pôdy charakteristické rašelinovým horizontom sa všeobecne vyskytujú prevažne

v nadmorských výškach okolo 800 m (tu zaberajú najväčšie plochy) a ďalej vo vrcholových polohách v nadmorských výškach 1200 – 1400 m. So svojimi extrémnymi fyzikálnymi, chemickými a biochemickými vlastnosťami vytvárajú špecifické ekologické podmienky pre vegetáciu (Pelíšek, 1972).

### 3.5 BIOGEOGRAFICKÉ POMERY

Hlavnou drevinou lesných porastov Hrubého Jeseníku je smrek obyčajný (*Picea abies*), primiešaná je jarabina vtáčia (*Sorbus aucuparia*), javor horský (*Acer pseudoplatanus*), breza plstnatá (*Betula pubescens*), v nižších polohách aj buk lesný (*Fagus sylvatica*). Kosodrevina (*pinus mugo*) bola v Hrubom Jeseníku umelo vysadená (Zeidler a kol., 2010).

Pre Hrubý Jeseník sú charakteristické a z prírodovedeckého hľadiska veľmi dôležité rastlinné spoločenstvá horských holí (Jeník, 1961).

Banaš a kol. (2001) považujú rastlinné spoločenstvá na deflačných plošinách najvyšších vrcholov, prítomnosť ktorých je zapríčinená klimatickými extrémami, za jedny z indikátorov pôvodného bezlesia. Tieto rastlinné spoločenstvá sú spojené s pôsobením mrazových javov (ihlicový ľad, kryosegregácia), soliflukcie a deflácie. Ide predovšetkým o vyfúkavané alpínske trávniky s arko – alpínskymi druhmi (napr. *Carex bigelowii*, *Juncus trifidus*, *Diphasiastrum alpinum*, *Hieracium alpinum*, a veľkým zastúpením lišajníkov a machov, najmä *Cetraria sp.*, *Cladonia sp.*) zväzu *Juncion trifidi*, zapojených smilkových trávnikov zo zväzu *Nardo-Caricion rigidae* (Praděd, Petrovy kameny - Břidličná, Keprník, Šerák, Červená hora, Králický Sněžník, Mravenečník) a alpínske vresoviská (Banaš a kol., 2001).

### 3.6 OCHRANA PŘÍRODY

Chránená krajinná oblasť Jeseníky bola vyhlásená v roku 1969. Celková rozloha chránenej krajinej oblasti je 740 km<sup>2</sup>. Na území chránenej krajinej oblasti sa nachádzajú 4 národné prírodné rezervácie (Praděd, Šerák – Keprník, Rejvíz, Rašeliniště Skřítek), 1 národná prírodná pamiatka (Javorový vrch), 18 prírodných rezervácií a 6 prírodných pamiatok.

Oblasť Hrubého Jeseníku je od roku 2004 súčasťou sústavy NATURA 2000.

### 3.7 ŠTUDOVANÉ ÚZEMIE

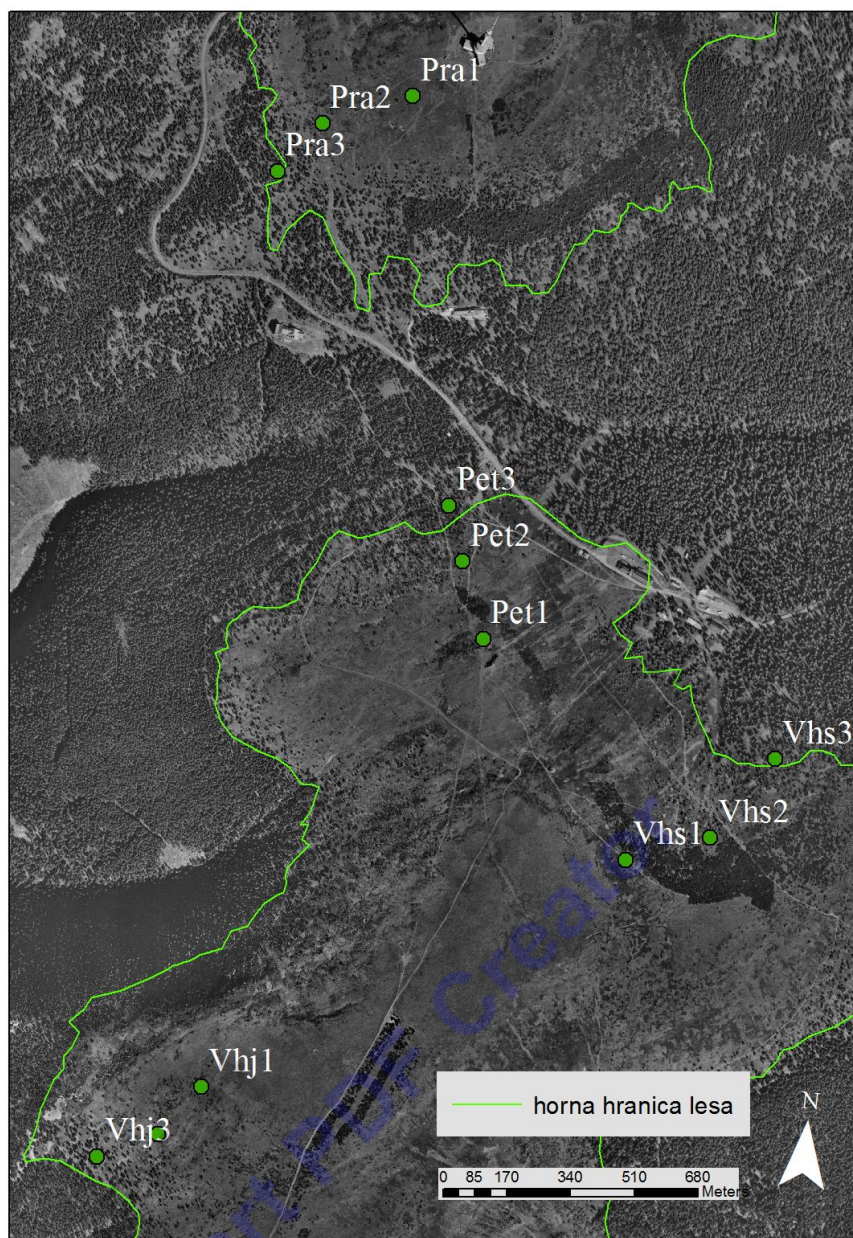
Záujmová oblasť ekotonu hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku sa nachádza v strednej časti hlavného hrebeňa na svahoch Pradědu (1492 m n.m.), Petrových kameňov (1435 m n.m.) a Vysokej Hole (1460 m n.m.). Reprezentovaná je dvanástimi stanoviskami, na ktorých prebehol odber vzoriek a zber údajov pre potrebné analýzy. Študované plochy sa nachádzajú v nadmorských výškach od 1355 do 1468 m, v porastoch smreka obyčajného (*Picea abies*).

Jednotlivé stanoviská, ktorých presná poloha bola určená už pri predošliých výskumoch (Treml a Banaš, 2008), sú lokalizované vo vertikálnych transektoch naprieč ekotonom hornej hranice lesa. Lokality sú situované na štyroch svahoch s výhodnou juhozápadnou (v práci sú označené kódom pra - Praděd a vñj – Vysoká Hole juh) a nevýhodnou severovýchodnou orientáciou (s pracovným pomenovaním pet – Petrovy kameny a vhs – Vysoká hole sever), v troch úrovniach v rámci prechodu lesa do bezlesia (obrázok 5, tabuľka 1).

Najnižšie položenú – „tretiu“ úroveň tvoria stanoviská pod hranicou zapojeného lesa (s označením pra3 a podobne.). Stanoviská „druhej“ úrovne sú lokalizované v porastoch klonálnych skupiniek smreku na hornej hranici stromov s minimálnou výškou 5 m (kód pra2 a podobne). „Prvá“ úroveň je tvorená lokalitami na hornej hranici výskytu samotne stojacich stromov alebo stromových skupiniek vyšších ako 2 m (pomenovanie pra1 atď.).

Stanoviská na severovýchodných aj juhozápadných svahoch s odpovedajúcou si polohou v rámci ekotonu hornej hranice lesa majú približne rovnakú nadmorskú výšku, lokality sú si podobné vzrastom stromov, ich priemerom a počtom stojacich jedincov (v prípade stromových skupiniek). Zvolené lokality v súčasnosti nie sú výrazne narušované činnosťou človeka.

Obrázok 5: Lokalizácia záujmových stanovísk





Tabuľka 1: Charakteristika záujmových stanovísk

| kód stanoviska | typ          | Nadmorská<br>výška<br>(m n.m.) | sklon svahu | orientácia |
|----------------|--------------|--------------------------------|-------------|------------|
| pra3           | hranica lesa | 1411                           | 12          | SW         |
| pra2           | skupinky 2   | 1443                           | 11          | SW         |
| pra1           | skupinky 1   | 1468                           | 10          | SW         |
| vhj3           | hranica lesa | 1348                           | 19          | SW         |
| vhj2           | skupinky 2   | 1400                           | 15          | SW         |
| vhj1           | skupinky 1   | 1436                           | 10          | SW         |
| pet3           | hranica lesa | 1361                           | 17          | NE         |
| pet2           | skupinky 2   | 1390                           | 14          | NE         |
| pet1           | skupinky 1   | 1429                           | 13          | NE         |
| vhs3           | hranica lesa | 1355                           | 14          | NE         |
| vhs2           | skupinky 2   | 1391                           | 12          | NE         |
| vhs1           | skupinky1    | 1424                           | 12          | NE         |

## 4. METÓDY

Prostredníctvom dendrochronologických metód, zahŕňajúcich postupne získanie dendrochronologického materiálu a jeho spracovanie do podoby vhodnej pre ďalšie využitie, boli získané potrebné údaje, ktoré boli ďalej štatisticky analyzované. Výstupy štatistických analýz boli hodnotené a porovnávané medzi jednotlivými záujmovými lokalitami (prípadne medzi typmi lokalít) s cieľom zistiť prípadné rozdiely v raste stromov na svahoch s opačnou expozíciou a určiť vzťah medzi rastom stromov a teplotami.

### 4.1 VÝBER STROMOV A ODBER VZORIEK

Na každom stanovisku prebehol zber série vzoriek – vývrtov, odoberaných z jedincov smreka obyčajného (*Picea abies*) v porastoch ekotonu hornej hranice lesa.

Prvým krokom pred samotným odberom vzoriek bol výber vhodných stromov. V porastoch na hranici zapojeného lesa boli vyhovujúce stromy živé, zdravé, z okolitých jedincov čo najmohutnejšie (dominantné a ko-dominantné), čím bol zaručený minimálny vplyv kompetície. Po prechode do medzernatých porastov stromových skupiniek a k samotne stojacim stromom platili pre výber jedincov obdobné kritériá, v prípade klonálnej skupinky bol vzorkovaný prednostne materský jedinec.

Vývrty s priemerom približne 5 mm boli odoberané pomocou Presslerových nebožiecov s dĺžkou 20 cm, 40 cm alebo 50 cm. Vrt bol vedený v smere kolmom na pozdĺžnu os kmeňa vo výške 1m nad pätou kmeňa, pričom táto výška môže mierne kolísať najmä v prípadoch, kedy umiestneniu vrtu v štandardnej výške bránilo napríklad

husté vetvenie. Z každého stromového jedinca boli takýmto spôsobom odoberané dva vývrty, jeden v smere po vrstevnici, ďalší v smere kolmom na prvý vrt, v snahe čo najviac eliminovať možnú prítomnosť reakčného dreva (podmieneného sklonom svahu, prípadne pôsobením vetra). Zároveň sa zvýšila šanca priblížiť sa čo najviac k počiatočnému, dreňovému letokruhu. Ak bol vývrt príliš výstredný, rozlámaný, alebo bola jeho kvalita inak znehodnotená, získaná bola náhradná vzorka. Jednotlivé vývrty boli vzápätí po odbere označené (poradové číslo stromu, kód lokality, dátum) a dočasne uložené do prenosných dosiek.

Pre každý strom boli zároveň na jednotlivých lokalitách zaznamenané GPS súradnice a určené vybrané dendrometrické charakteristiky: výška stromu (pri vyšších stromoch v zapojenom lese bola ich výška odhadovaná - zmeraním časti stromu metrom a odhadnutím výšky zvyšnej časti; nižšie jedince v stromových skupinkách boli zmerané celé od päty kmeňa po vrchol stromu), obvod kmeňa vo výške vývrtnu a priemerný ročný dĺžkový prírastok vetiev za posledných desať rokov (na piatich dominantných vetvách po obvode kmeňa bola zmeraná dĺžka práslenov posledných desiatich rokov, celkový priemerný ročný prírastok bol stanovený ako priemer práslenov všetkých vetiev; neúplne vytvorené prásleny z aktuálneho roku rastu počítané neboli).

Týmto spôsobom boli v teréne v období mesiacov august a október 2009 a júl a september 2010 odobraté vzorky z 13 až 22 stromov pre každé stanovisko - počet stromov bol ovplyvnený charakterom lokality, na niektorých najvyššie položených stanoviskách v rámci stromových skupiniek bol možný odber vzoriek iba z obmedzeného počtu vhodných jedincov.

## **4.2 SPRACOVANIE VZORIEK**

Po prenose z terénu boli vývrty v prenosných doskách ponechané prirodzenému vysušeniu, následne boli upevnené do drevených líšt v polohe odpovedajúcej prirodzenej polohe v rámci stromu. Jednotlivé vývrty boli postupne zbrúsené do roviny použitím brúsnych papierov s rôznou hrúbkou (80, 100, 180, 240 zrn/cm<sup>2</sup>).

Následne boli merané šírky letokruhov pomocou binokulárneho mikroskopu a špecializovaného posuvného meracieho prístroja (TimeTable) s presnosťou 0,01 mm, prepojeného s osobným počítačom a dendrochronologickou aplikáciou PAST 4 (Knibbe, 2004). Merací stôl je vybavený posuvným otočným aparátom a systémom zaznamenávajúcim intervaly posunov vrcholu stola a tým aj šírku letokruhu. Letokruhy

boli merané v smere rastu, teda od dreňového (prípadne od najstaršieho zmeraného) po najmladší.

Týmto spôsobom vznikla pre každé stanovisko séria kriviek absolútnych širok letokruhov. Niekoľko vývrtov bolo znehodnotených pri transporte, prípadne bolo zrejme iné významné poškodenie (zhnutý úsek, prítomnosť vetvenia, skrútenie), nebolo teda možné použiť ich na tvorbu letokruhových kriviek.

### 4.3 SPRACOVANIE ÚDAJOV

Získané krivky letokruhových širok boli podrobené datovaniu s cieľom umiestniť konkrétne krivky na časovej osi, prípadne identifikovať chýbajúce alebo falošné letokruhy. Pre znázornenie rastových trendov jednotlivých stanovísk boli vytvorené tzv. regionálne krivky, zachytávajúce vekový trend rastu stromov v konkrétnej lokalite (Mitchell, 1967). V ďalšej fáze boli krivky pre potrebu získania „čistého“ klimatického signálu detrendované (vekový trend bol odstránený). Následne boli vytvorené reziduálne letokruhovú chronológie pre jednotlivé stanoviská, ich kvalita bola hodnotená prostredníctvom vybraných štatistických parametrov.

#### 4.3.1 DATOVANIE

Za účelom presného a jednoznačného umiestnenia jednotlivých letokruhových kriviek v čase prebehlo datovanie, kedy bol každému letokruhu priradený konkrétny rok vytvorenia. Uprednostnený bol prístup k datovaniu založený na kombinácii vizuálneho hodnotenia a počítačových testoch zhody chronológií.

Základom pre tzv. krížové datovanie je vzájomné porovnávanie jednotlivých sérií. Cieľom je v každej krivke rozpoznať letokruhy vytvorené v tom istom roku. Ako vzorové letokruhovú série boli použité série z reprezentatívnych stanovísk, kde letokruhovú krivky nevyžadovali výraznejšie úpravy a vyznačovali sa vysokou mierou synchronizácie (predovšetkým stanovisko pra3). Dôležitými porovnávacími chronológiami boli aj už existujúce chronológie z najvyšších polôh Hrubého Jeseníku (Václav Tremel). Pre synchronizáciu bol tiež nápomocný výber významných rokov - tzv. signatúr (pointer years) (Schweingruber, 1996; Kyncl a Kyncl, 2002), slúžiacich ako jednotná osnova - kostra, použitá jednak v rámci jednotlivých stanovísk, ako aj celkovo pre všetky stanoviská medzi sebou. Prihliadané bolo aj na hodnoty pomocných štatistík programu PAST 4 (napr. súbežnosť, prekrytie, T-Test) (Knibbe, 2007).

Pri datovaní boli zároveň identifikované chýbajúce alebo falošné letokruhy, pri výskyte ktorých bolo potrebné zasiahnuť do priebehu letokruhovej krivky pridaním, alebo odstránením letokruhu. V prípade chýbajúceho letokruhu nadobudol doplnený letokruh hodnotu 0 a do ďalších analýz už nevstupoval, ak bol identifikovaný falošný letokruh, hodnota jeho šírky bola pripočítaná k predchádzajúcemu, alebo nasledujúcemu letokruhu.

Prvým krokom pri samotnom krížovom datovaní bolo vzájomné porovnanie dvoch vývrtov patriacich jednému stromu. V prípade, že oba vývrty po prípadných menších korektúrach vykazovali dostatočne vysokú mieru súbežnosti a odpovedali si vo významných rokoch, datovaná krivka aktuálnej letokruhovej šírky konkrétneho stromu bola vytvorená ako priemer z oboch vývrtov. V prípade, že sa jedna z páru kriviek výrazne odlišovala od hlavných porovnávacích chronológií a nebolo možné ju jednoznačne umiestniť na časovej osi, bola použitá iba druhá, vyhovujúca krivka.

Výsledná krivka z každého stromu bola v ďalších krokoch postupne porovnaná s ostatnými krivkami daného stanoviska a so vzorovými letokruhovými sériami. Po úspešnom datovacom procese mohli jednotlivé letokruhovú krivky vstúpiť do ďalších analýz.

#### 4.3.2 TVORBA RASTOVÝCH KRIVIEK

Za účelom porovnania biologických rastových trendov medzi jednotlivými stanoviskami boli vytvorené tzv. regionálne krivky rastu (Mitchell, 1967; Esper a kol., 2003).

Jednotlivé letokruhovú série stromov každého stanoviska boli usporiadané podľa kambiálneho veku (bez ohľadu na kalendárny rok vytvorenia). Dreňovému letokruhu bol teda priradený kambiálny vek jeden rok. V prípade, že vývrt nezasiahol priamo stred stromu, počet chýbajúcich letokruhov bol odhadnutý a doplnený k počtu nameraných letokruhov. Výsledkom je korigovaný vek stromu (Rolland a kol., 1998).

Dopočet letokruhov spočíva v odhade vzdialenosti chýbajúcej do geometrického stredu stromu, vezmúc do úvahy zakrivenie najstarších zachytených letokruhov. Následne je odhadnutý počet letokruhov, ktoré vyplňajú túto vzdialenosť. Ich počet závisí od rýchlosti rastu stromu, ktorá je vo výpočte vyjadrená priemernou šírkou letokruhu, počítanou zo širok prvých piatich zachytených letokruhov (Esper a kol., 2003; Batllori a Gutiérrez 2008).



Po zoradení všetkých kriviek stanoviska bola určená výsledná šírka letokruhu konkrétného kambialneho veku, počítaná ako aritmetický priemer širok letokruhov odpovedajúceho si veku zo všetkých stromov daného stanoviska. Úseky letokruhovej krivky pokryté menej ako piatimi čiastkovými sériami boli orezané. Rovnakým spôsobom boli rastové krivky, nezávislé na kalendárnom roku vzniku letokruhov, zhotovené pre všetky stanoviská. Výsledné krivky boli zhladené 25-ročným kubickým B-splinom.

Takto vekovo usporiadané časové série spoločne popisujú vekovo podmienený trend rastu typický pre konkrétny druh stromu, konkrétnu polohu a región. Predpokladá sa teda, že žiadne iné faktory ako vekový trend, nie sú v regionálnej rastovej krivke zachované (Esper a kol., 2003; Helama a kol., 2004).

#### 4.3.3 DETRENDOVANIE A TVORBA REZIDUÁLNYCH CHRONOLÓGIÍ

Informácie zachytené v letokruhových sériách je možné v kontexte s cieľom výskumu charakterizovať buď ako cieľový „signál“, alebo ako „šum“. Signál je definovaný ako informácia odvodená z letokruhu s podstatným významom pre študovaný problém, šum je naopak definovaný ako pre výskum nepodstatný. (Cook a kol., 1990).

Cieľovým signálom je v prípade tejto práce klimaticky podmienená premenlivosť letokruhov. Zároveň však každá letokruhová séria obsahuje aj neklimatické premenné, zapríčinené napr. disturbanciami a kompetíciou (vplyv ktorých bol minimalizovaný už samotným výberom vhodných stromov a dôsledným krížovým datovaním), alebo biologickými vplyvmi (vekový rastový trend) (Cook a kol., 1990).

Odstránenie neklimatického, vekovo podmieneného rastového trendu je nevyhnutné pre získanie „čistého“ cieľového signálu, tento proces sa nazýva detrendizácia (prípadne štandardizácia). Jednotlivé letokruhové série boli podrobené detrendovaniu v programe Arstan (Cook, 1985).

Samotný proces prebehol v troch základných fázach: v počiatočnej fáze, pred samotným detrendovaním, bolo potrebné upraviť údaje pomocou prispôbivej mocninnej transformácie (adaptive power transformation), čím sa v sériách zabezpečil relatívne stabilný rozptyl (homoskedascita), potrebný v prípade konštrukcie reziduálnych chronológií (Cook a Peters, 1997).

V nasledujúcej fáze bola pomocou kubického zhladzujúceho splinu vytvorená tzv. očakávaná rastová krivka (krivka pri uplatnení priemerných rastových podmienok) (Cook a Peters, 1997). Použitý kubický spline, pôsobiaci ako symetrický digitálny filter, má v programe Arstan pevne stanovenú prenosovú funkciu orezania na 50% amplitúdy rozptylu vo zvolenej perióde, ktorá je určená s prihliadnutím na priemernú dĺžku sérií (v tomto prípade bola použitá perióda 75 rokov).

Následne boli pre všetky série určené letokruhovú indexy, počítané ako reziduály z odhadnutej rastovej krivky (Cook a Peters, 1997). V prípade, že pôvodný rozptyl údajov nie je konštantný, alebo je stabilizovaný v prvej fáze detrendovania, odporúča sa počítať letokruhovú indexy práve ako reziduály, nie ako pomery (počítané ako pomer medzi pôvodnými hodnotami nedetrendovaných sérií a hodnotami z odhadnutej rastovej krivky) (Cook a Peters, 1997; Helama a kol., 2004).

Vzniknuté dielčie série letokruhových indexov boli spriemerované dvojitým váženým robustným priemerom (biweight robust mean) do jedinej výslednej série pre každú lokalitu - priemernej reziduálnej chronológie (Cook a Peters, 1997). Použitie robustného priemeru obmedzuje vplyv extrémnych hodnôt vo výpočtoch a teda minimalizuje náhodné lokálne odchýlky v raste stromov medzi jednotlivými stanoviskami, súvisiace predovšetkým s disturbanciami (Cook a kol., 1990).

Úseky reziduálnych chronológií zastúpené menej ako piatimi čiastkovými sériami boli orezané.

Reziduálne chronológie, ako série indexov letokruhových širok, sa vyznačujú nezávislosťou na predchádzajúcich hodnotách, t.j. nízkou autokoreláciou (Box a Jenkins, 1976). Práve z dôvodu nízkej miery autokorelácie a teda schopnosti citlivejšie reagovať na klimatické vplyvy boli pre analýzu vzťahu medzi šírkou letokruhu a teplotnými parametrami zvolené práve reziduálne chronológie (Fritts, 1976;). Vo všeobecnosti to nezmení výsledok analýz, ale zvýši sa hladina štatistickej významnosti výsledkov (Savva a kol., 2006).

#### *Základné štatistické parametre chronológií*

Po ukončení procesu detrendizácie bola pre každú výslednú chronológiu vyjadrená hodnota priemernej citlivosti, medzisériovej korelácie a hodnota EPS (vyjadrený populačný signál), s cieľom zobrazit' štatistické charakteristiky každej chronológie s možnosťou porovnania ich kvality.

Hodnota priemernej citlivosti (mean sensitivity) vyjadruje mieru medziročnej premenlivosti v šírke letokruhu (Savva a kol. 2002), popisuje schopnosť citlivej reakcie stromu na zmeny environmentálnych faktorov. Priemerná citlivosť závisí od druhu stromu a od konkrétneho regiónu, v prípade ihličnanov nadobúda spravidla hodnoty od 0,150 do 0,650 (Fritts, 1976).

Priemerná medzisériová korelácia (R<sub>BAR</sub>) vyjadruje mieru spoločnej premenlivosti medzi čiastkovými sériami (sila spoločného signálu), je nezávislá na počte vzoriek tvoriacich jednotlivé série (Wigley a kol., 1984). Medzisériové korelácie pozitívne korelujú s priemernou citlivosťou – stromy so silnejším spoločným signálom sú citlivejšie (Fritts, 1976).

Všeobecne najpoužívanším parametrom pre vyjadrenie kvality a spoľahlivosti letokruhovej chronológie je vyjadrený populačný signál, tzv. EPS (Wigley a kol., 1984). Tento ukazovateľ vyjadruje, do akej miery sa po vytvorení priemernej chronológie zachovala sila vnútorného signálu, v porovnaní s teoretickou chronológiou, založenou na populácii s nekonečným množstvom stromov (Wigley a kol., 1984).

Hodnota EPS pre konkrétne stanovisko závisí od celkového počtu sérií použitých pri tvorbe chronológie ( $t$ ) a od koeficientu priemernej medzisériovej korelácie čiastkových sérií ( $r$ ). Celková hodnota EPS bola počítaná pre každé stanovisko podľa vzťahu:  $EPS = r/[r+(1-r)/t]$  (Wigley a kol., 1984).

Okrem celkového EPS boli hodnoty EPS počítané aj pre úseky chronológií použitím plávajúcich korelačných okien. Šírka okna bola nastavená na hodnotu 20 rokov s pohybom v 10-ročných intervaloch (takto stanovené hodnoty korešpondujú s dĺžkou sérií). Hodnota EPS kolísala v rozmedzí od 0,0 do 1,0. Všeobecne akceptovaná hodnota spoľahlivej chronológie je 0,85 (Wigley a kol., 1984).

#### **4.4 ANALÝZA ROZDIELOV V RASTE STROMOV NA SVAHOCH S OPAČNOU EXPOZÍCIOU**

Medzi jednotlivými záujmovými lokalitami (prípadne medzi vytvorenými súhrnnými kategóriami) boli porovnávané trendy v raste stromov na svahoch s opačnou expozíciou s použitím pôvodných, neupravených širok letokruhov a prostredníctvom porovnania vybraných dendrometrických charakteristík.

#### 4.4.1 VZŤAH MEDZI KAMBIÁLNYM A KALENDÁRNYM VEKOM

V období zachytenom v letokruhových sériách boli analyzované zmeny v absolútnej rýchlosti rastu stromov. Pôvodná, neupravená, „hrubá“ šírka letokruhu bola vyhodnocovaná ako funkcia roku vytvorenia letokruhu v niekoľkých kambiálnych vekových triedach (Rolland a kol., 1998).

Letokruhovú krivku boli rozdelené do kambiálnych vekových tried v 20-ročných intervaloch, najskôr teda prebehol výber letokruhov prvých dvadsiatich rokov života každého stromu, potom boli vybrané letokruhy s kambiálnym vekom 21-40 rokov, 41-60 rokov a v prípade stanovísk na hranici lesa aj letokruhy s vekom 61-80 rokov.

Do analýzy bol zahrnutý aj odhadnutý počet letokruhov, chýbajúcich k dreňovému letokruhu (princíp odhadnutia počtu chýbajúcich letokruhov je popísaný v kapitole 4.3.2). Následne, z dôvodu nerovnomerného rozmiestnenia úsekov kriviek danej kambiálnej vekovej triedy na časovej osi, boli s ohľadom na orientáciu svahu a pozíciu vnútri ekotonu vytvorené súhrnné kategórie (stanoviská s rovnakou expozíciou v zapojenom lese - „hranica lesa“ a v stromových skupinkách - „skupinky“; pre doplnenie boli stanoviská v stromových skupinkách rozdelené podľa polohy v rámci ekotonu aj na „skupinky 1“ a „skupinky 2“).

Po nazhľukovaní stromov jednotlivých stanovísk boli všetky letokruhovú šírky danej kambiálnej vekovej triedy spriemerované použitím 5-ročného kĺzavého priemeru. Úseky zastúpené menej ako piatimi letokruhmi boli orezané. Priemerná šírka letokruhov daného kambiálneho veku bola vizuálne hodnotená a porovnávaná medzi vytvorenými súhrnnými kategóriami s rozdielnou orientáciou.

#### 4.4.2 POROVNANIE DENDROMETRICKÝCH CHARAKTERISTÍK

Vybrané dendrometrické charakteristiky (výška stromov, priemerný dĺžkový prírastok vetiev za posledných 10 rokov, obvod kmeňa vo výške vývrtu) boli hodnotené a porovnávané medzi jednotlivými záujmovými lokalitami. Pre každú lokalitu bol vyjadrený aritmetický priemer zaznamenaných dendrometrických charakteristík.

Priemerný dĺžkový prírastok vetiev a výška stromov boli zároveň porovnávané medzi komplementárnymi lokalitami (juhozápadné a severovýchodné svahy Vysokej Hole a opačne orientované svahy Praděda a Petrových kameňov, vždy v rovnakej polohe v rámci ekotonu hornej hranice lesa) pomocou jednosmernej analýzy rozptylu (jednocestná ANOVA) na hladine štatistickej významnosti  $p < 0,05$ .

#### 4.5 VZŤAH MEDZI RASTOM STROMOV A TEPLOTAMI

Vzájomný vzťah medzi reziduálnymi letokruhovými chronológiami a mesačnými teplotnými priemermi bol určený pomocou jednoduchých korelácií (výpočet Pearsonovho korelačného koeficientu).

Do úvahy boli vzaté mesačné priemery a rôzne sezónne priemery teplôt aktuálneho roku (roku rastu letokruhu) a roku predchádzajúceho. V aktuálnom roku boli korelované priemerné teploty jednotlivých mesiacov január – október a priemery teplôt rôznych častí vegetačnej doby v období máj – jún, máj – júl, máj – august a jún – júl. Z predchádzajúceho roku boli do analýzy zahrnuté priemerné teploty jednotlivých mesiacov máj – december a priemer teplôt v období október – november. Hladina štatistickej významnosti korelačných koeficientov bola nastavená na hodnotu  $p < 0,05$ .

Najskôr boli teploty s hodnotami reziduálnych chronológií korelované pre celé obdobie, ktoré konkrétna chronológia pokrývala. V mesiaci alebo období aktuálneho či predchádzajúceho roku, kde najvyššia hodnota celkového korelačného koeficientu ukázala najsilnejší vzťah medzi rastom stromov a príslušnou priemernou teplotou, boli vypočítané a graficky znázornené 11-ročné kĺzavé Pearsonove korelačné koeficienty s krokom jeden rok, s cieľom overiť stabilitu najsilnejších nájdených vzťahov v čase.

Následne boli korelačné koeficienty pre jednotlivé mesiace a obdobia všetkých stanovísk opätovne vypočítané a graficky znázornené, tento krát ale iba pre obdobie pokryté všetkými chronológiami.

Vzhľadom na veľmi krátke obdobie spoločné pre všetky chronológie so zároveň existujúcimi teplotnými meraniami, bolo zvlášť určené obdobie spoločné pre stanoviská v zapojenom lese a stanoviská v stromových skupinkách 2 (1960 – 2000) a zvlášť obdobie spoločné pre najvyššie položené stromové skupinky 1 (1982 – 2000).

##### 4.5.1 TEPLITNÉ ÚDAJE

Prvotne použité teplotné dáta pochádzajú z meteorologickej stanice na Praděde. Počiatky prvých teplotných meraní v Hrubom Jeseníku siahajú až do roku 1902 (Alfrédova myslivna, 1078 m n.m.), pravidelné merania na tejto stanici začali v roku 1907 a bez prerušenia pokračovali až do roku 1936 (tieto údaje ale znehodnocuje nevhodné umiestnenie teplomera, ktorý bol ovplyvňovaný teplom z chaty). Od augusta roku 1933 do roku 1938 prebehli sústavné merania teploty na Ovčárni v nadmorskej výške 1306 m. Od roku 1941 bolo pozorovanie prevádzané na vrchole Praděda,



z niektorých vojnových rokov ale nie sú k dispozícii údaje zo všetkých mesiacov. Neprerušené meranie bolo obnovené v novembri roku 1946 vo výške 1300 m n.m. a od mája roku 1947 na vrchole Praděda v nadmorskej výške 1492 m (meracie prístroje boli umiestnené vo výške 200 cm nad povrchom zeme) (Lednický a kol., 1973). V roku 1997 bolo teplotné meranie meteorologickej stanice na Praděde zrušené.

Obdobie pokryté letokruhovými chronológiami a zároveň aj teplotnými meraniami z Pradědu tvorí v prípade zahrnutia všetkých chronológií iba 15 rokov, spoločné obdobie pre stanoviská na hranici lesa a stromové skupinky 2 tvorí 37 rokov.

Vzhľadom na toto pomerne krátke obdobie bol pre skúmanie vzťahu medzi reziduálnymi chronológiami a teplotou použitý súbor mesačných teplotných údajov z Climatic research unit (CRU) v podobe gridu, pokrývajúci povrch Európy s 10 - minútovým rozlíšením (CRU TS 1.2, Mitchell a kol., 2003). Použité boli teplotné údaje z jedného štvorca gridu, zahŕňajúce územie  $17^{\circ}$  -  $17^{\circ}10'$  v.z.d. a  $50^{\circ}$ - $50^{\circ}10'$  s.z.š., priemerná nadmorská výška vybraného štvorca je 650 m. Teplotné údaje pokrývajú obdobie rokov 1901-2000.

Vhodnosť a použiteľnosť „gridových“ teplôt bola overovaná prostredníctvom Pearsonových korelačných koeficientov s pôvodnými teplotami z Pradědu.

#### 4.5.2 ANALÝZA HLAVNÝCH KOMPONENTOV

Na obdobie rokov 1964-2009, pokryté všetkými chronológiami s vynechaním dvoch najkratších (vhs1 a pra1), bola aplikovaná a graficky zobrazená metóda analýzy hlavných komponentov (tzv. principal component analysis – PCA). (CANOCO, Ter Braak a Šmilauer, 1998)

Princípom analýzy hlavných komponent je odvodenie menšieho množstva lineárnych kombinácií (hlavných komponentov) z množiny pôvodných premenných pri zachovaní čo najviac informácií, obsiahnutých v pôvodných premenných (Jolliffe, 2002).

Základom je teda výpočet súboru vzájomne nezávislých premenných – hlavných komponentov (osí), ktoré sú lineárnou kombináciou pôvodných, originálnych premenných. Prvý hlavný komponent vysvetľuje najväčšiu časť variability premenných (vystihuje maximálny objem informácií pôvodných premenných), druhý komponent vysvetľuje druhú najväčšiu časť variability (vystihuje maximálny objem informácií pôvodných premenných, ktoré neboli vystihnuté prvým hlavným komponentom) atď.

Analýza hlavných komponentov teda zobrazuje podobnosť jednotlivých reziduálnych chronológií (Jolliffe, 2002).

Za účelom určenia rozdielov vo vzťahu chronológií k teplotám boli skóry jednotlivých chronológií na osiach, vysvetľujúcich najväčšiu časť celkovej variability korelované s teplotnými premennými.

## **5. VÝSLEDKY**

### **5.1 ŠTATISTICKÁ CHARAKTERISTIKA LETOKRUHOVÝCH CHRONOLÓGIÍ**

Zo smrekových porastov v ekotone hornej hranice lesa boli odobraté vzorky z 221 stromov. Do procesu datovania vstúpilo 419 vzoriek (v dôsledku výrazného

porušenia alebo rozlámania, spôsobeného predovšetkým pri transporte z terénu, analyzované nemohli byť všetky získané vzorky). Datovaním úspešne prešlo 363 vývrtov z 201 stromov, ktoré vstúpili do ďalších analýz.

V prípade 21 sérií bolo pri krížovom datovaní po identifikácii chýbajúcich alebo falošných letokruhov nutné zasiahnuť do letokruhovej krivky doplnením alebo odstránením letokruhu (priemerný počet doplnených chýbajúcich letokruhov na strom je pre každé stanovisko uvedený v tabuľke 2).

Pre každú študovanú lokalitu boli zostavené letokruhovú chronológiu (obrázok 6) a určené ich základné štatistické charakteristiky (tabuľka 2).

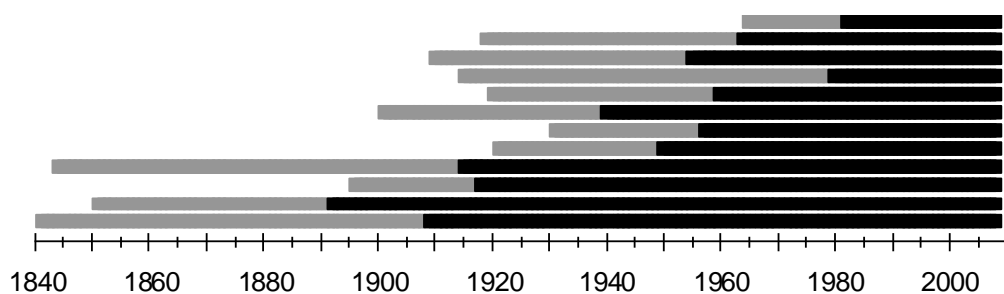
Priemerný počet stromov, použitých pri tvorbe chronológií je 17, s minimom 13 stromov (stanovisko vhs1) a maximom 21 použitých stromov (stanovisko pra1).

Úplné, neorezané letokruhovú chronológiu z hranice lesa pokrývajú dlhšie obdobie ako chronológiu zo stromových skupiniek, lokality na hranici lesa sa vyznačujú všeobecne staršími stromami ako stanoviská zo stromových skupiniek. Najstarší zmeraný letokruh s rokom vzniku 1841 pochádza zo stanoviska pra3. Na stanoviskách v stromových skupinkách 2 je najstarším zmeraným letokruhom letokruh z roku 1901 zo stanoviska pet2 a v skupinkách 1 pochádza najstarší letokruh zo stanoviska vhl1, rok vytvorenia tohto letokruhu je rok 1910.

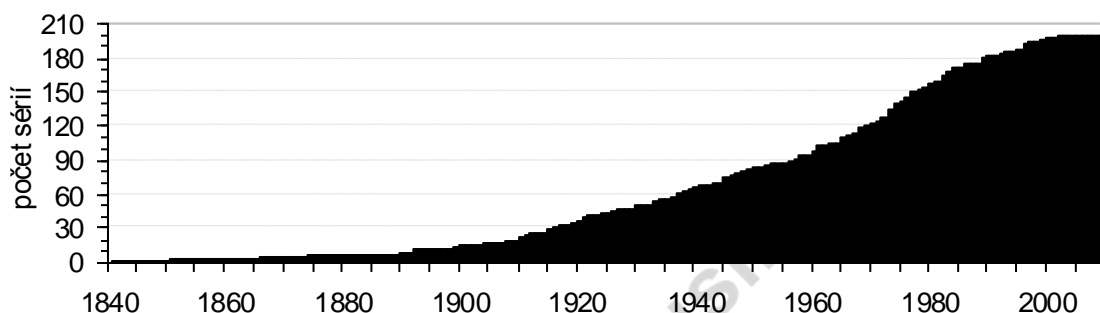
Po orezaní častí chronológií so zastúpením menej ako piatich čiastkových sérií sa celkové obdobie zachytené v letokruhovúch sériách skrátilo z pôvodných 169 rokov na 118 rokov. Umiestnenie jednotlivých letokruhovúch chronológií v čase znázorňuje obrázok 7. Výsledné obdobie rokov 1892-2009 je pokryté 201 čiastkovými letokruhovými sériami, ich distribúcia v čase je zobrazená na obrázku 8.

Obrázok 7: Umiestnenie jednotlivých letokruhovúch chronológií na časovej osi. Každý horizontálny pruh reprezentuje jednu z dvanástich chronológií, šedou farbou sú znázornené orezané časti chronológií, čierna farba vyjadruje výsledné časti chronológií, vstupujúce do ďalších analýz.





Obrázok 8: Distribúcia všetkých čiastkových sérií



Priemerná dĺžka 201 čiastkových sérií tvoriacich stanoviskové chronológie je 58 rokov s minimálnou priemernou hodnotou 29 rokov na stanovisku vhs1 a maximálnou priemernou hodnotou 96 rokov na stanovisku vjh3. Individuálna dĺžka čiastkových sérií je v rozsahu od 9 do 118 rokov. Chronológie na hranici lesa sú všeobecne tvorené dlhšími čiastkovými sériami ako chronológie zo skupiniek stromov, porasty na hranici lesa sú staršie ako v skupinkách stromov.

Pre všetky študované lokality bola určená priemerná šírka letokruhu s najnižšou priemernou hodnotou na stanovisku vjh1 (0,787 mm) a najvyššou priemernou hodnotou 1,936 mm na stanovisku vjh3. Celková priemerná šírka letokruhov zmeraných v porastoch ekotonu hornej hranice lesa na všetkých študovaných lokalitách je 1,430 mm.

Sila spoločného signálu letokruhových chronológií bola stanovená prostredníctvom priemernej citlivosti, priemerných medzisériových korelácií (RBAR) a vyjadreného populačného signálu (EPS) (tabuľka 2).

Hodnoty priemernej citlivosti chronológií sa medzi dvanástimi stanoviskami pohybujú od 0,218 do 0,356. Najvyššia priemerná citlivosť je zaznamenaná v stromových skupinkách 1, kde jednotlivé hodnoty neklesajú pod hodnotu 0,33. Všeobecne vyššia je priemerná citlivosť stromov na juhozápadných svahoch.

Priemerné hodnoty medzisériových korelácií jednotlivých stanovísk sú relatívne vysoké, rozsah hodnôt je od 0,294 do 0,499. Najviac spolu korelujú čiastkové série letokruhových chronológií z hranice lesa.

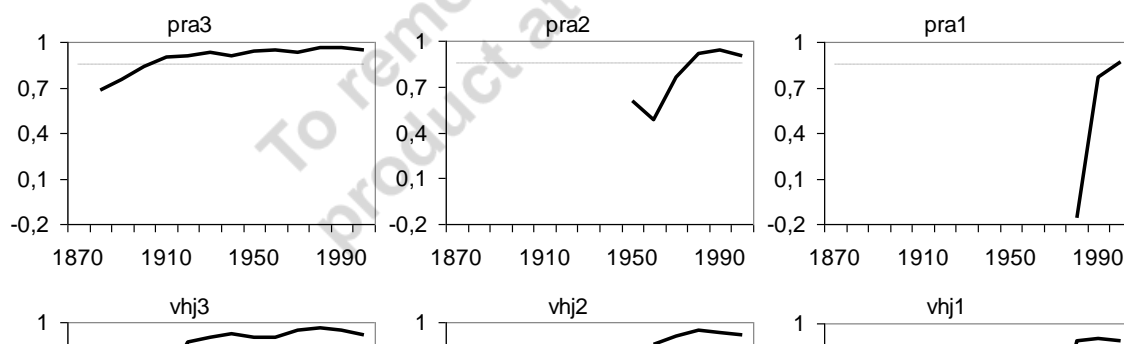
Priemerná hodnota EPS na všetkých stanoviskách presahuje hodnotu 0,85. Najvyššiu hodnotu (0,94) dosahuje EPS (závisiace na počte sérií) na stanoviskách pra3, pet1 a vhs3, naopak najnižšia hodnota (0,87) bola vypočítaná na stanovisku pet2.

Hodnoty EPS ale nie sú v čase konštantné, menia sa. Hodnoty plávajúcich EPS (pre celé, neorezané chronológie) dosahujú nižšie hodnoty v staršom období, čo súvisí s nižším počtom čiastkových sérií v počiatočných rokoch chronológií (obrázok 9). Najvyššie hodnoty sa bez ohľadu na polohu v ekotone hranice lesa a orientáciu svahu vyskytujú vo všetkých prípadoch na konci zaznamenaného obdobia chronológií, čo súvisí s maximálnym počtom čiastkových sérií tvoriacich chronológie v tomto období.

Hodnoty plávajúcich EPS všetkých chronológií z hranice lesa sú trvalo stabilné a prekračujú limitnú hodnotu 0,85 približne po roku 1930. Mierne vyššie hodnoty plávajúcich EPS takmer v celom zachytenom období je možné pozorovať na juhozápadne orientovaných stanoviskách (pra3, vjh3).

V prípade stanovísk zo stromových skupiniek dosahujú hodnoty EPS stále nadlimitné hodnoty ( $> 0,85$ ) približne po roku 1980. Výnimkou je stanovisko pra1, v prípade ktorého je hodnota plávajúcich EPS  $> 0,85$  dosiahnutá až po roku 1997. Po roku 1980, kedy je priebeh čiastkových EPS v stromových skupinkách 2 už relatívne ustálený, je možné, podobne ako pri stanoviskách na hranici lesa, pozorovať mierne vyššie hodnoty EPS na výhodne juhozápadne orientovaných svahoch (pra2 a vjh2). Lokality v stromových skupinkách 1 neukazujú podobnú tendenciu, vyššie hodnoty plávajúcich EPS naopak dosahujú stanoviská na severovýchodných svahoch.

Obrázok 9: Plávajúci vyjadrený populačný signál (EPS). Šírka plávajúceho korelačného okna je 20 rokov, s pohybom v 10-ročných intervaloch, prerušovaná línia vyjadruje kritickú hodnotu 0,85.



## 5.2 BIOLOGICKÉ RASTOVÉ KRIVKY

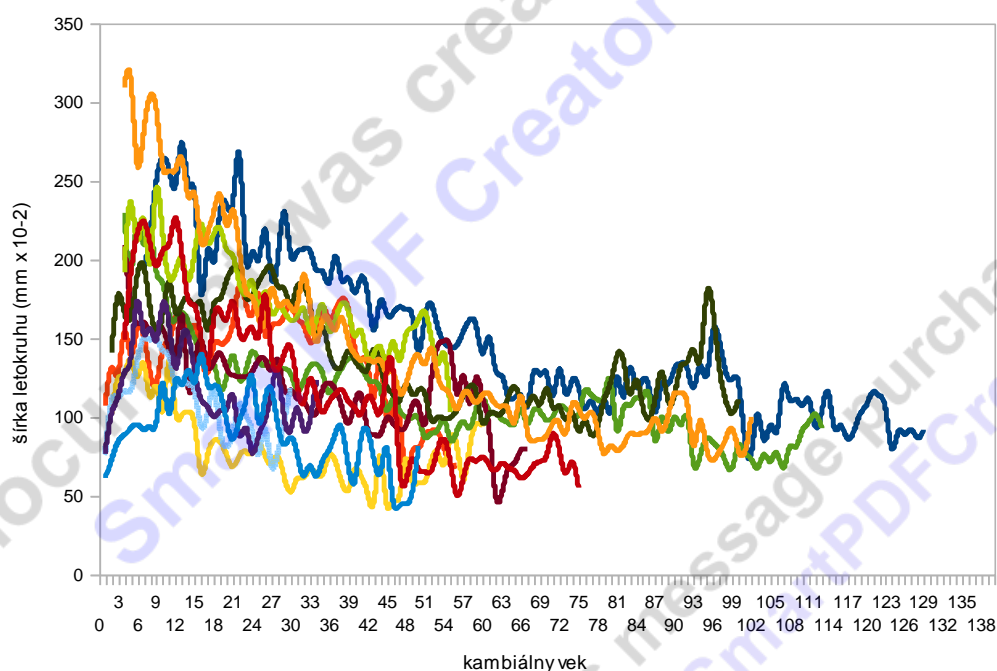
Zoradenie neupravených sérií letokruhových širok podľa ich kambiálneho veku a výpočet výslednej regionálnej krivky pre všetky stanoviská umožnil porovnanie vekovo podmienených trendov v raste stromov medzi jednotlivými lokalitami (obrázok 10).

Na priebehu rastových kriviek je dobre viditeľný blízky vzťah medzi zvyšujúcim sa vekom stromov a spomaľujúcim sa rastom (vekový trend). Tvar kriviek je blízky negatívnej exponenciále, klesajúcej so stúpajúcim vekom stromov. Trendy v priebehu kriviek na jednotlivých stanoviskách si odpovedajú - u všetkých stanovísk (s výnimkou stanoviska pet3 a pra3) je možné bez ohľadu na expozíciu alebo polohu v rámci ekotonu hornej hranice lesa pozorovať nepravidelné, ale zreteľné stúpanie krivky v najmladšom veku stromov. Po rýchlom vzostupe dosahujú krivky pomerne skoro maximum, následne začínajú postupne klesať, spočiatku rýchlejšie, neskôr sa klesanie spomaľuje. Šírka letokruhu sa so stúpajúcim kambiálnym vekom stromu znižuje. Na konci

všetkých biologických rastových kriviek je možné vidieť mierne rozširovanie letokruhov.

Počiatkový priebeh rastových kriviek stanovísk pet3 a pra3 sa odlišuje oproti ostatným stanoviskám v priebehu kriviek v mladom veku stromov, kedy je zrejmy pokles od počiatkového zachyteného veku. Je to však spôsobené nedostatočným počtom zmeraných letokruhov (<5) v najmladších rokoch života stromov. Vývrty z porastov hornej hranice lesa sa vyznačujú všeobecne vyšším vychýlením od stredu stromu a v dôsledku toho aj vyšším počtom letokruhov odhadnutých a doplnených k dreňovému letokruhu. Počet chýbajúcich letokruhov bol doplnený, avšak do výpočtu priemernej šírky letokruhu v danom kambialnom veku stromu tieto letokruhy nevstupovali. Podobné vysvetlenie (znížený počet sérií v danom období) má aj rozširovanie letokruhov na konci rastových kriviek.

Obrázok 10: Biologické rastové krivky jednotlivých stanovísk zhladené 25-ročným kubickým B-splinom. Časti zastúpené menej ako 5 sériami boli orezané.



### 5.3 REZIDUÁLNE CHRONOLÓGIE

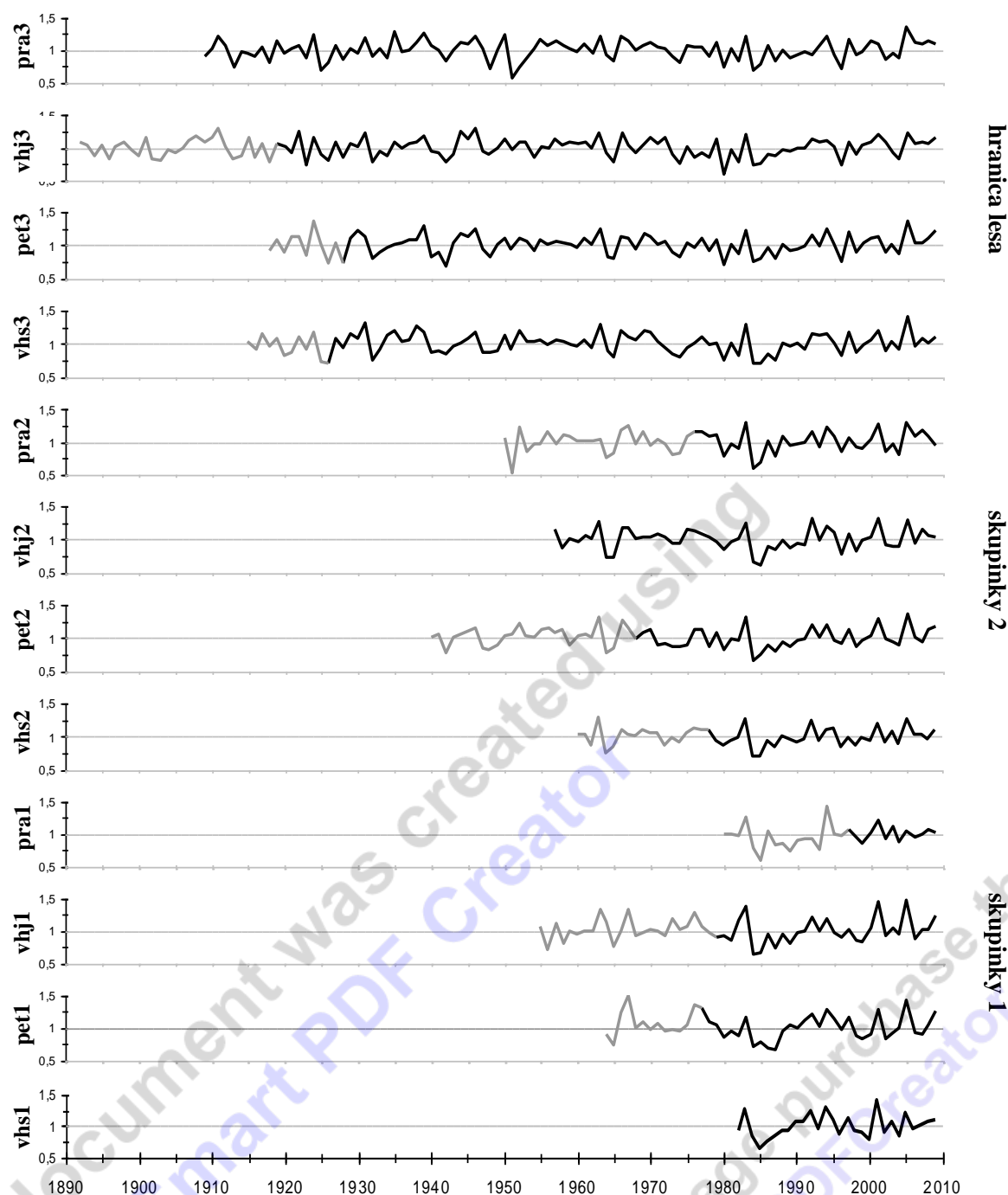
Pre všetky študované lokality boli zostavené reziduálne chronológie (obrázok 6). Ich porovnanie medzi jednotlivými stanoviskami (prípadne medzi typmi stanovísk) umožnilo objaviť spoločné trendy a rozdiely v radiálnom príraste stromov.

Reziduálne chronológie pochádzajúce z lokalít na hranici lesa majú bez ohľadu na orientáciu stanoviska podobné tendencie v príraste stromov. Obdobie zníženého šírkového prírastu je možné pozorovať na prelome 30. a 40. rokov a koncom 40. rokov, zreteľná rastová depresia je viditeľná tiež v rokoch 1964-1965. Najviditeľnejší podpriemerný rast je na všetkých stanoviskách na hranici lesa badateľný od konca 70. do konca 80. rokov. Vnútri tohto obdobia spomaleného rastu je ale významným rok 1983 s nadpriemerne vysokým prírastom, výrazný hlavne na severovýchodne orientovaných svahoch. Zvýšený prírast stromov na lokalitách v zapojenom lese je charakteristický tiež pre začiatok 70. rokov a pre obdobie od začiatku 90. rokov až do súčasnosti, s výraznejším pozitívom v roku 2005.

V reziduálnych chronológiách, zostavených zo sérií pochádzajúcich z lokalít v stromových skupinkách, sa prejavujú podobné trendy ako pri chronológiách z hranice lesa. Výrazné negatívne rastové anomálie sa vyskytujú v rokoch 1964-1965, 1973-1974 a v rokoch 1984-1985, vnútri obdobia dlhodobej rastovej depresie od konca 70. do konca 80. rokov. Podobne ako pri chronológiách z hranice lesa, aj tu je viditeľný výrazne vyšší prírast v roku 1983. Ďalšími pozitívnymi rastovými anomáliami sa vyznačujú roky 2001 a 2005. Od 90. rokov je zaznamenaný zvýšený šírkový prírast stromov v skupinkách 1 aj 2, tento trend je výraznejší v stromových skupinkách 1. Tu sa následne v rokoch 1998-1999 objavuje výraznejšia negatívna rastová anomália, ktorá má síce rovnaký priebeh aj na ostatných lokalitách, neprejavuje sa však tak výrazne.

Rok 1951 je rokom nízkych hodnôt letokruhových indexov, prejavuje sa výrazne najmä na juhozápadnom svahu Pradědu (stanoviská pra3 a pra2, chronológia stanoviska pra1 nesiahá až do roku 1951). Menšie hodnoty indexov letokruhov sú pre tento rok typické na všetkých lokalitách, nie sú však odlišiteľné od bežného kolísania rastu. Stanoviská pra3 a pra2 naopak v tomto roku dosahujú minimálnu hodnotu v celom priebehu reziduálnych chronológií.

Obrázok 6: Reziduálne chronológie jednotlivých stanovísk. Časti chronológií, kde vyjadrený populačný signál nedosahuje hodnotu 0,85, majú šedú farbu.



Korelácie medzi jednotlivými reziduálnymi chronológiami sú všeobecne vysoké (tabuľka 3). V prípade všetkých transektov naprieč ekotonom hornej hranice lesa sú korelácie medzi najbližšími stanoviskami (hranica lesa - skupinky 2, skupinky 2 - skupinky 1) vždy vyššie ako tie medzi vzdialenejšími stanoviskami (hranica lesa – skupinky 1). Pri porovnaní korelačných koeficientov medzi transektami sú vyššie hodnoty obvykle nájdené medzi stanoviskami odpovedajúcimi si z hľadiska polohy v rámci ekotonu. Najmenej spolu korelujú stanoviská pra1 a vjh3 (v spoločnom období 1980-2009), najviac stanoviská vhs2 a vjh2 (spoločné obdobie rokov 1960-2009).



Tabuľka 3: Pearsonove korelácie medzi jednotlivými reziduálnymi chronológiami. Korelované je vždy najdlhšie možné spoločné obdobie dvojice chronológií. Šedou farbou je zvýraznená hodnota korelačného koeficientu štatisticky významná na hladine  $p < 0,05$ , všetky ostatné hodnoty sú štatisticky významné na hladine  $p < 0,01$ .

|               | pra3<br>*1909 | pra2<br>*1950 | pra1<br>*1980 | vhj3<br>*1892 | vhj2<br>*1957 | vhj1<br>*1955 | pet3<br>*1918 | pet2<br>*1940 | pet1<br>*1964 | vhs3<br>*1915 | vhs2<br>*1960 | vhs1<br>*1982 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| pra3<br>*1909 | 1,00          |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| pra2<br>*1950 | 0,72          | 1,00          |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| pra1<br>*1980 | 0,60          | 0,70          | 1,00          |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| vhj3<br>*1892 | 0,73          | 0,59          | 0,45          | 1,00          |               |               |               |               |               |               |               |               |
| vhj2<br>*1957 | 0,74          | 0,83          | 0,66          | 0,71          | 1,00          |               |               |               |               |               |               |               |
| vhj1<br>*1955 | 0,55          | 0,56          | 0,70          | 0,48          | 0,79          | 1,00          |               |               |               |               |               |               |
| pet3<br>*1918 | 0,75          | 0,73          | 0,61          | 0,84          | 0,80          | 0,61          | 1,00          |               |               |               |               |               |
| pet2<br>*1940 | 0,66          | 0,71          | 0,69          | 0,73          | 0,81          | 0,67          | 0,83          | 1,00          |               |               |               |               |
| pet1<br>*1964 | 0,61          | 0,76          | 0,53          | 0,51          | 0,76          | 0,75          | 0,70          | 0,78          | 1,00          |               |               |               |
| vhs3<br>*1915 | 0,74          | 0,75          | 0,57          | 0,78          | 0,82          | 0,65          | 0,83          | 0,86          | 0,75          | 1,00          |               |               |
| vhs2<br>*1960 | 0,67          | 0,80          | 0,63          | 0,63          | 0,88          | 0,75          | 0,77          | 0,82          | 0,74          | 0,83          | 1,00          |               |
| vhs1<br>*1982 | 0,58          | 0,79          | 0,73          | 0,72          | 0,83          | 0,81          | 0,74          | 0,83          | 0,85          | 0,80          | 0,84          | 1,00          |

\* počiatočný rok chronológie

## 5.4 CITLIVOSŤ REZIDUÁLNYCH CHRONOLÓGIÍ NA TEPLoty

### 5.4.1 POROVNANIE TEPLÔT Z METEOROLOGICKEJ STANICE PRADĚD A TEPLÔT Z CRU TS 1.2

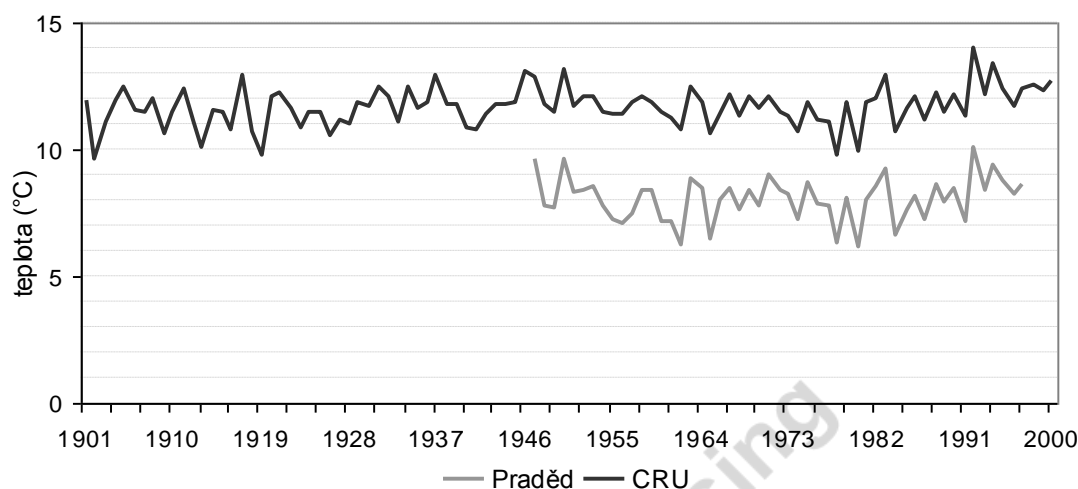
Korelácie medzi pôvodnými teplotnými údajmi z Pradědu a „novými“ teplotami z CRU TS 1.2 dosahujú dostatočne vysoké hodnoty (tabuľka 4), preto pre analýzu vzťahov medzi rastom stromov a teplotami mohli byť použité práve tieto „nové“ teplotné údaje.

Priebeh priemerných teplôt vo vegetačnej sezóne z oboch zdrojov je veľmi podobný (Obrázok 11). Rozdiel je v hodnotách teplôt, kedy vyššie teploty (asi o 3 °C) sú zaznamenané pri CRU TS 1.2. Dôvodom je fakt, že priemerná nadmorská výška vybraného gridu je 650 m, teda o takmer 850 m menej, než dosahuje meteorologická stanica na Praděde. Pre korelácie s reziduálnymi chronológiami ale nie je podstatná absolútna hodnota teplôt, ale ich priebeh v čase, preto tento rozdiel nie je prekážkou pre ďalšie použitie teplotných údajov CRU TS 1.2.

Tabuľka 4: Pearsonove korelácie medzi teplotami z meteorologickej stanice Praděd (1492 m n.m.) a teplotami z Climatic research unit (CRU TS 1.2, priemerná nadmorská výška je 650 m n.m.) v spoločnom období rokov 1947-1996. Jednotlivé hodnoty vyjadrujú korelácie teplôt medzi oboma zdrojmi v totožnom mesiaci. Korelačné koeficienty sú významné na hladine  $p < 0,01$ .

| I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII  | VIII | IX   | X    | XI   | XII  |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,83 | 0,89 | 0,87 | 0,86 | 0,95 | 0,91 | 0,95 | 0,91 | 0,92 | 0,80 | 0,78 | 0,82 |

Obrázok 11: Priemerné teploty vzduchu vo vegetačnej sezóne (V-VIII) z meteorologickej stanice Praděd (1492 m n.m.) a z Climatic research unit (CRU TS 1.2, priemerná nadmorská výška je 650 m n.m.)



#### 5.4.2 CELKOVÉ KORELÁCIE MEDZI REZIDUÁLNymi CHRONOLÓGIAMI A PRIEMERNÝMI TEPLOTAMI VZDUCHU V MAXIMÁLNOM MOŽNOM OBDOBÍ JEDNOTLIVÝCH CHRONOLÓGIÍ

Z tabuľky 5, zobrazujúcej korelačné koeficienty medzi rôznymi teplotnými priemermi a reziduálnymi chronológiami jednotlivých stanovísk, je viditeľné, že stanoviská na hranici lesa (pra3, vjh3, pet3, vhs3) pozitívne korelujú predovšetkým s teplotnými priemermi rôznych častí vegetačného obdobia (V-VI, V-VII, V-III, VI-VII) a s niektorými jednotlivými mesiacmi vegetačného obdobia (VI a VII, v prípade niektorých stanovísk sa objavuje štatisticky významný vzťah aj s teplotou mesiacov V a VIII). Okrem teplôt vegetačného obdobia sa vysoké korelačné koeficienty, významné na hladine  $p < 0,05$  vyskytujú aj v mesiaci október predchádzajúceho roku rastu letokruhu, v prípade severovýchodne orientovaných stanovísk na hranici lesa aj v období X-XI predchádzajúceho roku a v prípade stanoviska vhs3 aj v novembri predchádzajúceho roku.

Štatisticky významná je na stanovisku pet3 aj negatívna korelácia s priemernou teplotou mája predchádzajúceho vegetačného obdobia.

Rovnako aj chronológie pochádzajúce zo skupiniek 2 ukazujú výrazné pozitívne korelácie najmä s priemernými teplotami častí vegetačného obdobia (V-VII, V-VIII, VI-VII). Na rozdiel od chronológií zo zapojeného lesa už však korelácia s teplotným

priemerom mesiacov V-VI nie je štatisticky významná. Pri hodnotení vzťahov chronológií s teplotou jednotlivých mesiacov vegetačného obdobia roku rastu letokruhu je viditeľné, že podobne ako na hranici lesa, aj tu sa vyskytujú štatisticky významné korelácie s mesiacom júl (všetky stanoviská skupiniek 2) a s mesiacom august (s výnimkou stanoviska pra2), na rozdiel od stanovísk na hranici lesa ale korelácie s júnom nie sú štatisticky významné (iba v prípade stanoviska pet2). Čo sa týka negatívnych korelačných koeficientov, významnú hodnotu dosahujú v prípade troch stanovísk (pra2, pet2 a vhs2) v máji predchádzajúceho roku, v ostatných mesiacoch nie je dosiahnutá stanovená hladina významnosti. Na rozdiel od stanovísk na hranici lesa neboli v stromových skupinkách 2 nájdené významné korelácie v žiadnom z jesenných mesiacov predchádzajúceho roku.

Obdobne ako pri chronológiách pochádzajúcich z hranice lesa a zo skupiniek 2, aj chronologie zo skupiniek 1 pozitívne korelujú s vegetačným obdobím roku vytvorenia letokruhu (priemery V-VII, V-VIII, VI-VII), prípadne s jeho jednotlivými mesiacmi VI (pra1), VII (pra1, vhl1, vhs1) a VIII (vhs1).

Chronológia stanoviska pet1 významne koreluje iba s priemernou teplotou mesiaca február, v ostatných mesiacoch ani obdobiach korelačné koeficienty nedosahujú zvolenú hladinu významnosti.

Významná pozitívna korelácia na januárovú priemernú teplotu a negatívna korelácia na teplotu októbra aktuálneho roku bola zistená na stanovisku vhs1.

Tabuľka 5: Celkové Pearsonove korelácie reziduálnych chronológií a teplotných priemerov. Zvýraznené hodnoty korelačných koeficientov sú štatisticky významné na hladine  $p < 0,05$ . Šedou farbou je zvýraznená najvyššia hodnota korelačného koeficientu konkrétneho stanoviska.

|           | pV           | pVI          | pVII        | pVIII       | pIX         | pX          | pXI          | pXII        | pX-XI       | I           | II          | III   |
|-----------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| pra3*1909 | -0,06        | -0,19        | -0,16       | 0,01        | 0,10        | <b>0,29</b> | 0,05         | 0,06        | 0,20        | -0,10       | -0,07       | 0,00  |
| vhj3*1892 | -0,06        | -0,17        | -0,03       | 0,18        | 0,09        | <b>0,21</b> | 0,10         | -0,01       | 0,19        | 0,00        | 0,03        | -0,09 |
| pet3*1918 | -0,06        | <b>-0,22</b> | -0,09       | 0,08        | 0,09        | <b>0,27</b> | 0,11         | -0,01       | <b>0,24</b> | 0,14        | 0,07        | 0,07  |
| vhs3*1915 | -0,18        | -0,05        | 0,00        | 0,08        | 0,10        | <b>0,26</b> | <b>0,21</b>  | -0,03       | <b>0,31</b> | 0,02        | 0,00        | -0,02 |
| pra2*1950 | <b>-0,32</b> | -0,20        | -0,14       | -0,18       | 0,09        | 0,14        | 0,02         | 0,20        | 0,09        | 0,20        | 0,04        | 0,12  |
| vhj2*1957 | -0,26        | -0,11        | -0,13       | 0,00        | 0,07        | -0,04       | -0,06        | 0,01        | -0,07       | 0,18        | 0,21        | 0,18  |
| pet2*1940 | <b>-0,28</b> | -0,06        | -0,14       | -0,05       | 0,05        | 0,15        | -0,01        | -0,08       | 0,08        | 0,05        | 0,06        | 0,00  |
| vhs2*1960 | <b>-0,33</b> | -0,05        | -0,01       | -0,08       | 0,02        | -0,08       | 0,05         | -0,04       | 0,00        | 0,17        | 0,08        | 0,07  |
| pra1*1980 | 0,18         | 0,09         | -0,16       | -0,12       | -0,07       | 0,04        | -0,06        | 0,22        | -0,04       | 0,36        | 0,04        | 0,12  |
| vhj1*1955 | -0,10        | -0,04        | -0,12       | 0,05        | 0,15        | 0,01        | 0,08         | -0,13       | 0,07        | 0,12        | 0,12        | 0,08  |
| pet1*1964 | -0,27        | -0,05        | -0,03       | -0,07       | -0,01       | 0,12        | -0,01        | -0,03       | 0,05        | 0,22        | <b>0,37</b> | 0,31  |
| vhs1*1982 | -0,17        | 0,22         | 0,02        | 0,14        | -0,08       | -0,14       | 0,14         | 0,06        | 0,06        | <b>0,52</b> | 0,37        | 0,35  |
|           | IV           | V            | VI          | VII         | VIII        | IX          | X            | V-VI        | V-VII       | V-VIII      | VI-VII      |       |
| pra3*1909 | -0,07        | 0,13         | <b>0,38</b> | <b>0,25</b> | 0,12        | -0,02       | -0,07        | <b>0,33</b> | <b>0,39</b> | <b>0,37</b> | <b>0,44</b> |       |
| vhj3*1892 | 0,07         | <b>0,25</b>  | <b>0,43</b> | <b>0,28</b> | <b>0,22</b> | -0,13       | -0,14        | <b>0,44</b> | <b>0,49</b> | <b>0,49</b> | <b>0,50</b> |       |
| pet3*1918 | 0,07         | <b>0,24</b>  | <b>0,35</b> | <b>0,29</b> | <b>0,29</b> | -0,08       | -0,10        | <b>0,39</b> | <b>0,45</b> | <b>0,49</b> | <b>0,45</b> |       |
| vhs3*1915 | -0,05        | 0,16         | <b>0,42</b> | <b>0,22</b> | <b>0,23</b> | -0,11       | 0,00         | <b>0,38</b> | <b>0,41</b> | <b>0,44</b> | <b>0,45</b> |       |
| pra2*1950 | 0,09         | 0,25         | 0,14        | <b>0,33</b> | 0,20        | -0,12       | 0,22         | 0,27        | <b>0,39</b> | <b>0,39</b> | <b>0,34</b> |       |
| vhj2*1957 | 0,19         | 0,07         | 0,26        | <b>0,44</b> | <b>0,38</b> | 0,10        | <b>0,03</b>  | 0,21        | <b>0,41</b> | <b>0,46</b> | <b>0,48</b> |       |
| pet2*1940 | 0,07         | 0,08         | <b>0,28</b> | <b>0,34</b> | <b>0,26</b> | -0,10       | 0,02         | 0,22        | <b>0,35</b> | <b>0,40</b> | <b>0,42</b> |       |
| vhs2*1960 | 0,07         | 0,11         | 0,15        | <b>0,46</b> | <b>0,31</b> | 0,09        | 0,12         | 0,16        | <b>0,38</b> | <b>0,41</b> | <b>0,44</b> |       |
| pra1*1980 | 0,08         | -0,05        | <b>0,48</b> | <b>0,45</b> | 0,32        | 0,06        | -0,21        | 0,21        | <b>0,44</b> | <b>0,43</b> | <b>0,60</b> |       |
| vhj1*1955 | 0,12         | 0,00         | 0,27        | <b>0,39</b> | 0,29        | 0,07        | -0,06        | 0,16        | <b>0,34</b> | <b>0,38</b> | <b>0,45</b> |       |
| pet1*1964 | -0,06        | 0,04         | 0,08        | 0,32        | 0,25        | -0,04       | 0,13         | 0,07        | 0,24        | 0,28        | 0,29        |       |
| vhs1*1982 | -0,10        | -0,18        | 0,39        | <b>0,71</b> | <b>0,58</b> | 0,20        | <b>-0,47</b> | 0,08        | <b>0,57</b> | <b>0,63</b> | <b>0,77</b> |       |

\* počiatočný rok chronológie

#### 5.4.3 VZŤAH RASTU STROMOV K TEPLOTÁM V SPOLOČNOM OBDOBÍ ROKOV 1960-2000 (1982-2000), POKRYTOM VŠETKÝMI CHRONOLÓGIAMI

Obdobie spoločné pre všetky reziduálne chronológie je z hľadiska identifikácie rozdielov vo vzťahoch medzi rastom stromov a teplotami na rozličných stanoviskách najdôležitejšie. Celkové korelácie rôzne dlhých období jednotlivých chronológií v predchádzajúcej kapitole (kapitola 5.4.2) môžu skresľovať rozdiely medzi stanoviskami práve z dôvodu rozlične dlhých korelovaných období.

Z obrázku 12, znázorňujúceho korelácie v období spoločnom pre stanoviská na hranici lesa a v stromových skupinkách 2, je viditeľné, že ako stromy na hranici lesa, tak aj stromy zo skupiniek 2 najviac pozitívne korelujú s rôznymi kombináciami priemerov po sebe idúcich mesiacov vo vegetačnom období a s jednotlivými mesiacmi

vegetačného obdobia. Na rozdiel od korelácií, v ktorých boli zahrnuté celé použiteľné časti jednotlivých chronológií (tabuľka 5), v prípade spoločného obdobia nie sú zistené štatisticky významné vzťahy s ďalšími teplotnými priemermi. Výnimkou sú stanoviská v<sub>hj3</sub> (významná pozitívna korelácia s aprílom aktuálneho roku) a v<sub>hj2</sub> a v<sub>hs2</sub> (významné negatívne korelácie s mesiacom máj predchádzajúceho roku).

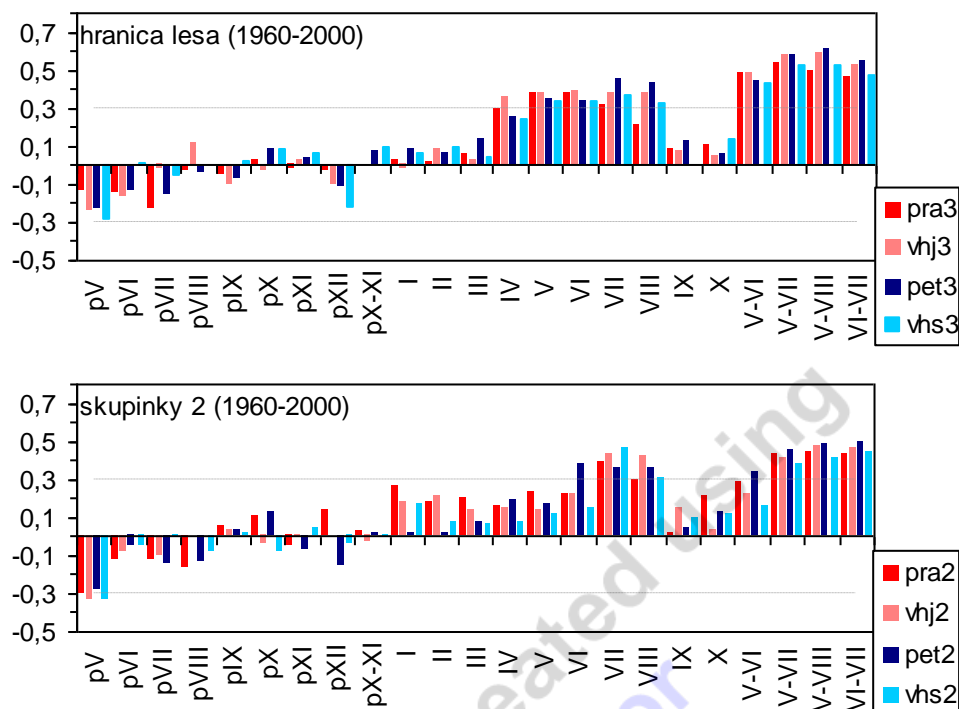
Hodnoty štatisticky významných korelačných koeficientov letokruhových chronológií a priemerných teplôt častí vegetačného obdobia (V-VI, V-VII, V-VIII, VI-VII) sú v rozpätí od 0,43 do 0,61 na hranici lesa a v rozpätí od 0,33 do 0,50 v stromových skupinkách 2. Hodnoty významných korelačných koeficientov nadobúdajú v prípade jednotlivých mesiacov vegetačnej sezóny hodnoty 0,32-0,45 na hranici lesa a hodnoty 0,31-0,46 v skupinkách 2. Vo veľkosti korelačných koeficientov teda medzi lokalitami s odlišnou polohou v rámci ekotonu hornej hranice lesa nie sú výrazné rozdiely, mierne vyššie hodnoty sú zaznamenané v prípade korelácií viacmesačných teplotných priemerov vegetačnej doby na stanoviskách na hranici lesa.

Odlišnosť je viditeľná pri pohľade na korelácie jednotlivých mesiacov vegetačného obdobia, kedy sa prejavuje posun najsilnejších vzťahov s priemernými teplotami z jednotlivých mesiacov máj, jún, júl a čiastočne august na hranici lesa, na mesiace júl a august v skupinkách 2. Na hranici lesa navyše koreluje jedno stanovisko (v<sub>hj3</sub>) aj s priemernou teplotou v apríli. V stromových skupinkách 2 je významná korelácia s júnovými teplotami zaznamenaná iba v prípade jediného stanoviska (pet2), ostatné korelačné koeficienty nedosahujú hladinu štatistickej významnosti.

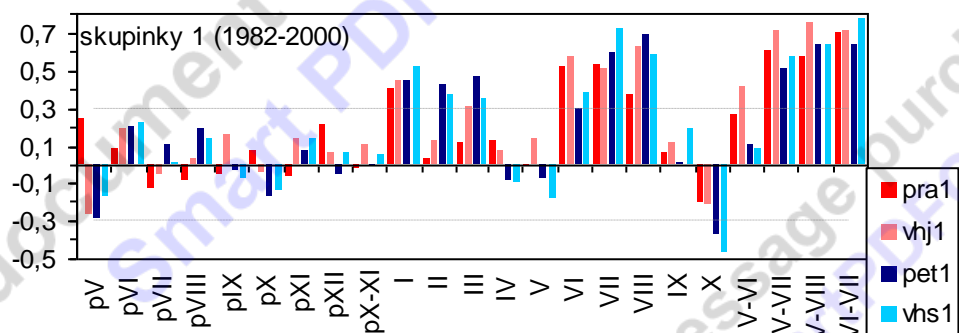
Pri porovnávaní rozdielov vo vzťahu k teplotám medzi stanoviskami s výhodnou juhozápadnou a nevýhodnou severovýchodnou expozíciou boli odlišnosti nájdené iba v prípade lokalít na hranici lesa, kde v jednotlivých mesiacoch máj a jún a v období máj - jún sú korelácie vyššie na juhozápadných svahoch. V iných mesiacoch ani obdobiach na hranici lesa ani v stromových skupinkách nie sú jednoznačné rozdiely medzi stanoviskami s opačnou expozíciou.



Obrázok 12: Pearsonove korelácie medzi teplotnými priemermi a reziduálnymi chronológiami z hranice lesa a stromových skupiniek 2 v spoločnom období rokov 1960-2000. Prerušovaná línia naznačuje hladinu štatistickej významnosti  $p = 0,05$ .



Obrázok 13: Pearsonove korelácie medzi teplotnými priemermi a reziduálnymi chronológiami zo stromových skupiniek 1 v spoločnom období rokov 1982-2000. Prerušovaná línia naznačuje hladinu štatistickej významnosti  $p = 0,05$ .



Korelácie priemerných teplôt a reziduálnych chronológií stromových skupiniek 1 (obrázok 13) sa od predchádzajúcich opisovaných stanovísk mierne líšia. Je však potrebné vziať do úvahy, že spoločné korelované obdobie nie je zhodné s rozsahom spoločného obdobia pre hranicu lesa a stromové skupinky 2 a zároveň je aj pomerne krátke (19 rokov), čo môže ovplyvniť výsledky korelácií.

Štatisticky významné pozitívne korelácie sú zistené v prípade priemerov mesiacov V-VII, V-VIII, VI-VII, korelácie s priemerom mesiacov V-VI ale hladinu

štatistickej významnosti dosahujú iba pri stanovisku v<sub>h</sub>1. Rozsah hodnôt štatisticky významných korelačných koeficientov je 0,41-0,77.

Možné je pozorovať pokračovanie trendu v posune silnejšieho vzťahu s jednotlivými mesiacmi máj, jún, júl a čiastočne august na hranici lesa na mesiace júl a august v stromových skupinkách. S júlovou teplotou viac korelujú severovýchodne orientované stanoviská. Juhozápadne orientované stanoviská p<sub>ra</sub>1 a v<sub>h</sub>1 korelujú významne aj s júnovou teplotou. Rozsah korelačných koeficientov je 0,37-0,71.

Štatisticky významné sú pozitívne korelácie s januárovým teplotným priemerom, výrazné najmä na severovýchodných svahoch. Severovýchodne orientované stanoviská tiež pozitívne korelujú s mesiacmi február a marec.

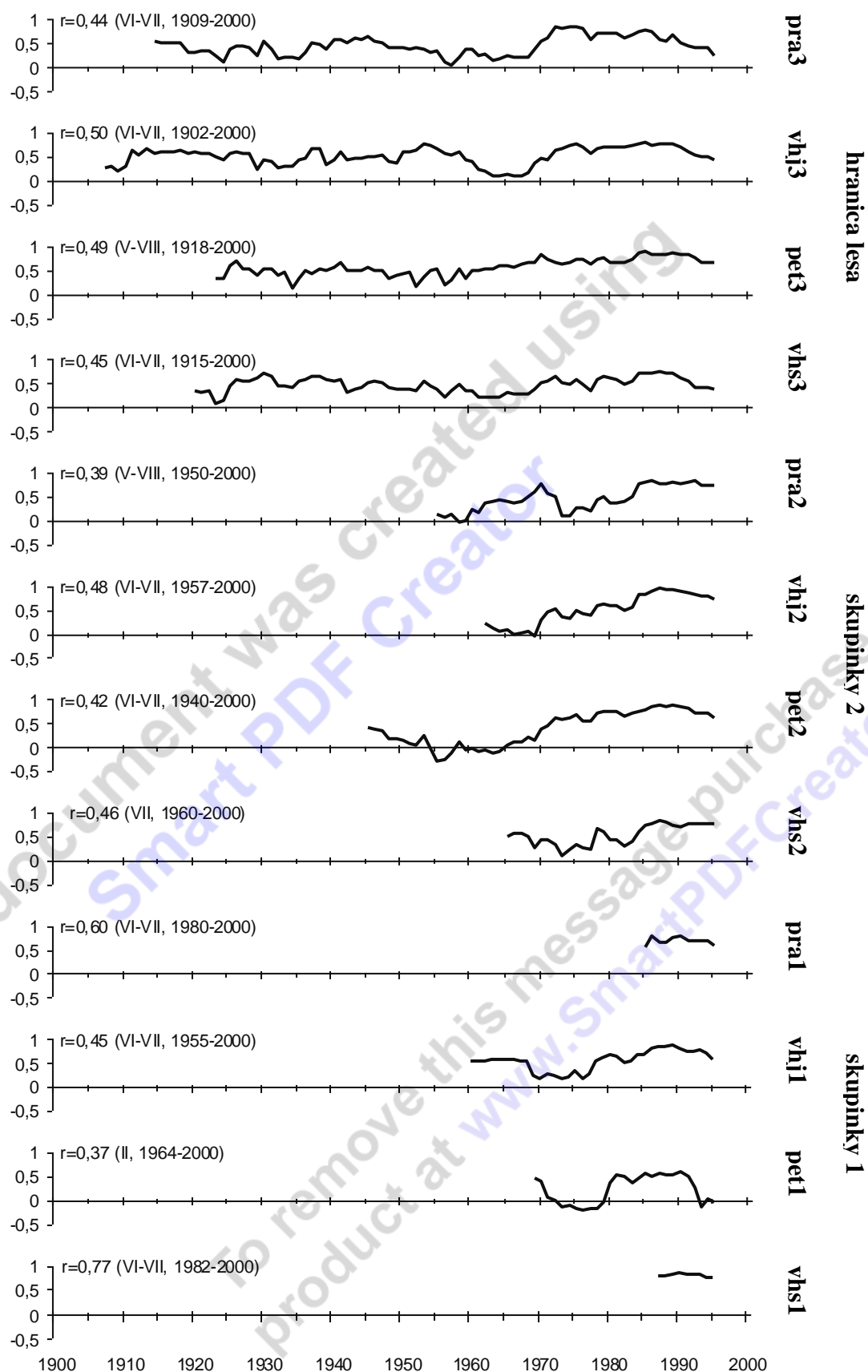
V najvyššie položených stromových skupinkách sa oproti ostatným stanoviskám objavujú výrazné negatívne korelácie s októbrom aktuálneho roku, štatisticky významné hodnoty dosahujú na severovýchodných svahoch.

#### 5.4.4 ZMENY V STABILITE VZŤAHOV MEDZI RASTOM STROMOV A TEPLITAMI

Najsilnejšie nájdené vzťahy medzi rastom stromov a teplotnými priemerami na jednotlivých stanoviskách (tabuľka 5), vyjadrené najvyššou hodnotou korelačného koeficientu, nie sú v čase stále. Zmeny v stabilite, určené pomocou plávajúcich Pearsonových korelácií, graficky znázorňuje obrázok 14.

Strata citlivosti chronológií na teploty je viditeľná v období silného znečistenia kyslým spadom SO<sub>2</sub> v 70. a 80. rokoch. Pri stanoviskách v stromových skupinkách 1 strácajú stromy citlivosť na teploty skôr v 70. rokoch, stromy z hranice lesa o niečo neskôr a strata citlivosti nie je tak výrazná ako pri stromových skupinkách. Väčšina chronológií stráca citlivosť aj v priebehu obdobia približne od polovice 50. do polovice 60. rokov (stanovisko v<sub>h</sub>3 v 60. rokoch). Chronológie z hranice lesa strácajú citlivosť na teploty vo vegetačnej sezóne aj približne okolo roku 1930. V tomto období sú korelácie nahrádzané prevažne silnejšími koreláciami s jednotlivými mesiacmi vegetačnej sezóny, prípadne s jesennými teplotami predchádzajúceho roku – predovšetkým v prípade stanovísk z hranice lesa.

Obrázok 14: 11-ročné plávajúce korelácie šírok letokruhov a teplotných priemerov s najvyššou hodnotou celkového Pearsonovho korelačného koeficientu.



## 5.5 VARIABILITA REZIDUÁLNYCH CHRONOLÓGIÍ

Analýza hlavných komponentov (PCA) redukovala celkovú premenlivosť chronológií do niekoľkých hlavných komponentov – osí (obrázok 15), čím umožnila nájsť všeobecné zákonitosti v premenlivosti reziduálnych chronológií a ich vzťahu k teplotám.

Prevažná väčšina premenlivosti je vysvetlená prvou a druhou osou. Os x vysvetľuje 78 % variability, os y vysvetľuje 9 % variability dát. Veľká väčšina variability je vysvetlená prvou osou, všeobecne sa teda dá povedať, že jednotlivé série sú si veľmi podobné. Druhá os vysvetľuje menej variability, je možné tu už vidieť určité rozdiely medzi chronológiami.

Najviac podobné sú si chronológie pochádzajúce z rovnakých polôh v rámci hornej hranice lesa (všetky stanoviská z hranice lesa, zo stromových skupiniek 1 a stromových skupiniek 2), na druhej osi vytvárajú akési skupiny s podobnými hodnotami korelácií, pričom najmenej podobné sú si chronológie z hranice lesa a stromových skupiniek 1.

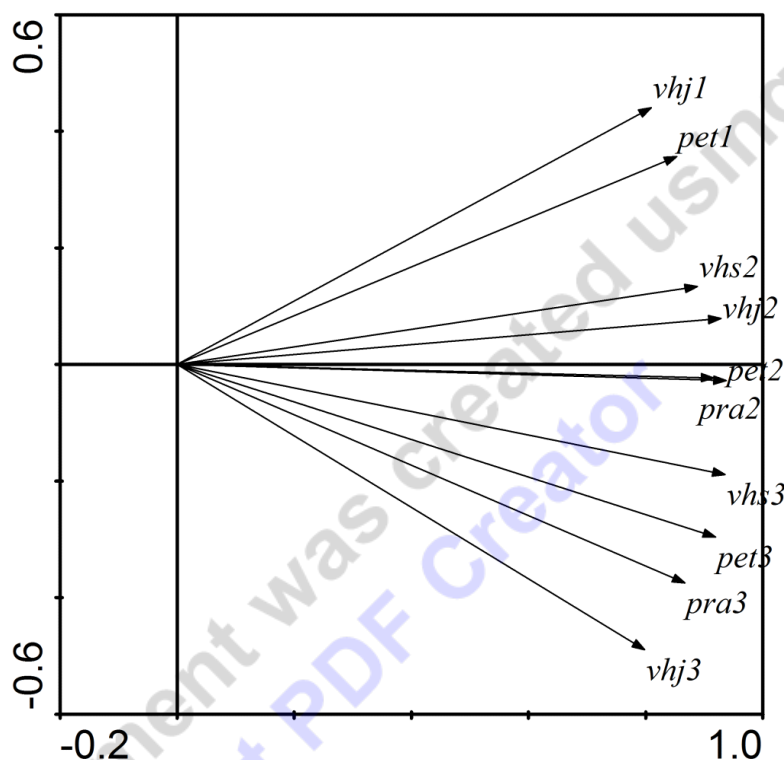
Najslabší vzťah k ostatným chronológiám majú chronológie stanovísk vjh1 a pet1, ktoré ale navzájom korelujú dosť silno (tabuľka 6). Najmenšiu podobnosť ukazujú chronológie vjh1 a vjh3 a naopak najväčšiu podobnosť chronológie stanovísk pra2 a pet2. Pri chronológiách z hranice lesa je možné vidieť väčšiu podobnosť medzi chronológiami z rovnako orientovaných svahov, v stromových skupinkách 2 je situácia opačná.

Skóry jednotlivých chronológií na prvej osi sú pozitívne korelované s teplotnými priemerami jednotlivých mesiacov VII a VIII a s priemerami období V-VI, V-VII, V-VIII a VI-VII. Druhá os je negatívne korelovaná s priemerami teplôt mesiacov IV a V a s priemerami teplôt v obdobiach V-VI a V-VII (tabuľka 7).

Ak sú do analýzy hlavných komponentov zahrnuté aj najkratšie chronológie pra1 a vhs1 (obrázok 16), potom prvou osou je vysvetlených 82 % variability, 5 % variability vysvetľuje druhá os. Všeobecne sú zákonitosti premenlivosti chronológií rovnaké ako pri vynechaní najkratších stanovísk. Väčšina chronológií má pomerne vysoké skóry na osi x, výnimkou je chronológia stanoviska pra1, jej vzťah k teplotám sa

teda od ostatných chronológií mierne líši. Je však potrebné brať do úvahy pomerne krátke spoločné obdobie (28 rokov), vstupujúce do analýzy hlavných komponentov v prípade, že sú použité všetky chronológie. Z tohto dôvodu tiež nebolo prístupné ku koreláciám medzi jednotlivými chronológiami v tomto spoločnom období, ani ku koreláciám medzi skórami osí a teplotnými priemermi.

Obrázok 15: Grafické zobrazenie analýzy hlavných komponentov, vynesené sú prvé dve osi. Dve najkratšie letokruhovú chronológie (pra1 a vhs1) boli vynechané, ostatné chronológie pokrývajú spoločné obdobie rokov 1964-2009.



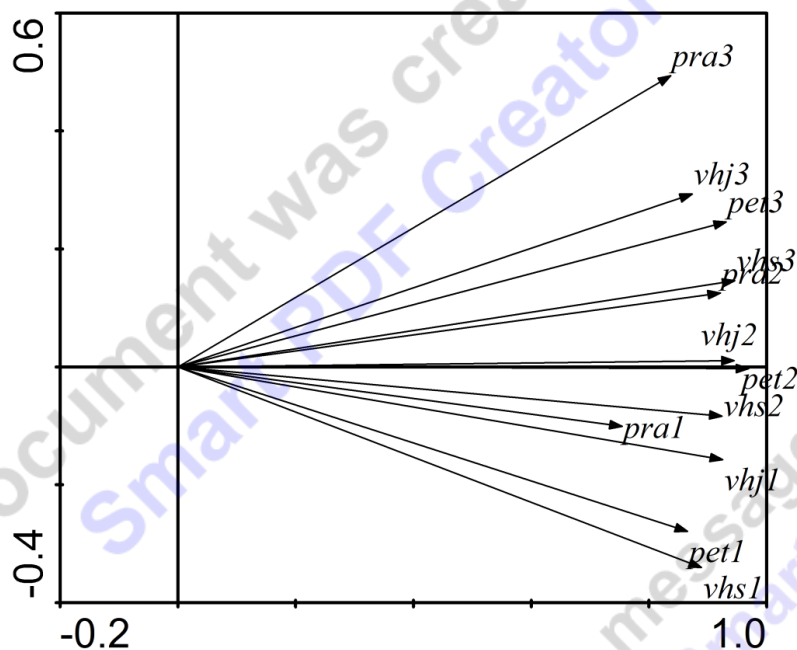
Tabuľka 6: Korelácie medzi jednotlivými chronológiami použitými v analýze hlavných komponentov (vynechané sú dve najkratšie chronológie - pra1 a vhs1) v období rokov 1964-2009. Hodnoty korelačných koeficientov sú významné na hladine  $p < 0,01$ .

|      | pra3 | pra2 | vhj3 | vhj2 | vhj1 | pet3 | pet2 | pet1 | vhs3 | vhs2 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| pra3 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| pra2 | 0,81 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |      |
| vhj3 | 0,84 | 0,67 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |      |
| vhj2 | 0,74 | 0,88 | 0,71 | 1,00 |      |      |      |      |      |      |
| vhj1 | 0,58 | 0,66 | 0,49 | 0,77 | 1,00 |      |      |      |      |      |
| pet3 | 0,92 | 0,82 | 0,86 | 0,80 | 0,62 | 1,00 |      |      |      |      |
| pet2 | 0,81 | 0,83 | 0,75 | 0,83 | 0,74 | 0,87 | 1,00 |      |      |      |
| pet1 | 0,61 | 0,76 | 0,51 | 0,76 | 0,75 | 0,70 | 0,78 | 1,00 |      |      |
| vhs3 | 0,86 | 0,83 | 0,82 | 0,82 | 0,66 | 0,92 | 0,88 | 0,75 | 1,00 |      |
| vhs2 | 0,65 | 0,85 | 0,61 | 0,89 | 0,74 | 0,77 | 0,81 | 0,74 | 0,82 | 1,00 |

Tabuľka 7: Teplotné priemery, korelujúce so skórami prvej alebo druhej osi analýzy hlavných komponentov na hladine štatistickej významnosti  $p < 0,05$ .

|      | IV    | V     | VII  | VIII | V-VI  | V-VII | V-VIII | VI-VII |
|------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|--------|
| os x |       |       | 0,44 | 0,37 | 0,36  | 0,52  | 0,54   | 0,52   |
| os y | -0,38 | -0,42 |      |      | -0,44 | -0,35 |        |        |

Obrázok 16: Grafické zobrazenie analýzy hlavných komponentov, vynesené sú prvé dve osi. Použité sú všetky chronológie, pokrývajúce spoločné obdobie rokov 1982-2009.





## **5.6 ROZDIELY V ABSOLÚTNOM RASTE STROMOV MEDZI STANOVISKAMI**

### **5.6.1 VZŤAH MEDZI KAMBIÁLNYM A KALENDÁRNÝM VEKOM**

Na študovaných lokalitách boli analyzované zmeny v absolútnej rýchlosti rastu stromov, pôvodná „hrubá“ šírka letokruhov bola hodnotená ako funkcia roku vytvorenia letokruhu vo vybraných kambiálnych vekových triedach (obrázok 17 a 18). Použitie neupravených hodnôt letokruhových prírastov zo vzoriek s podobným vekom umožnilo odhaliť prechodných trendov v raste stromov bez možného negatívneho vplyvu detrendovania.

Meniace sa šírky letokruhov v jednotlivých kambiálnych vekových triedach sú z dôvodu prehľadnosti zobrazené najskôr pre stanoviská na hranici lesa a stanoviská v stromových skupinkách (obrázok 17), na obrázku 18 sú následne pre detailnejšiu analýzu zobrazené skupinky 1 a skupinky 2 jednotlivo.

Krivky letokruhových šírok z lokalít na hranici lesa ukazujú, že u najmladších stromov (1-20 rokov) dochádzalo v celom zachytenom období k striedaniu zvýšeného a zníženého prírastu, celkový trend je zvyšovanie prírastu. Rozdiely v príraste medzi výhodne a nevýhodne orientovanými stanoviskami sú tiež striedavé.

Stromy s kambiálnym vekom 21-40 rokov ukazujú miernejšie sa zvyšujúcu tendenciu rastu oproti mladším stromom vo väčšej časti pokrytého obdobia (1925-1975), od roku 1950 prirastajú viac stromy na nevýhodne severovýchodne orientovaných stanoviskách.

Pri stromoch s vekom od 41 do 60 a od 61 do 80 rokov je viditeľná zreteľná rastová depresia v 70. a 80. rokoch, následne začínajú stromy opäť výrazne prirastať od 90. rokov. V kambiálnej vekovej triede 41-60 ročných stromov nie sú

badateľné výraznejšie rozdiely v raste stromov na výhodných a nevýhodných stanoviskách, v triede 61-80 ročných stromov prirastajú mierne rýchlejšie stromy na stanoviskách s juhozápadnou orientáciou.

Letokruhové krivky odvodené z najmladších stromov (1-20 rokov) z lokalít v stromových skupinkách ukazujú výraznú rastovú depresiu v 70. a 80. rokoch, po ktorej nasleduje postupné rozširovanie letokruhov od 90. rokov. Do 90. rokov viac prirastali stromy na severovýchodných svahoch, v nasledujúcom období sú prírasty striedavo vyššie raz na výhodných, raz na nevýhodných lokalitách.

Pri 21-40 ročných stromoch sa tak isto prejavuje výrazné stenčovanie letokruhov v 70. a 80. rokoch a následné rýchle rozširovanie, s maximálnou šírkou letokruhov na konci zaznamenaného obdobia. V celom zachytenom období je prírast stromov s nevýhodnou severovýchodnou orientáciou mierne vyšší ako pri stromoch s juhozápadnou orientáciou.

Rastová depresia v 80. rokoch a nasledujúce zrýchľovanie rastu od 90. rokov je dobre rozpoznateľné aj v priebehu letokruhových kriviek najstarších stromov (41-60 rokov). V rýchlosti rastu medzi expozične opačnými lokalitami nie je významný rozdiel, mierne rýchlejšie prirastajú počas celého zobrazeného obdobia stromy na svahoch s juhozápadnou expozíciou.

Pri porovnaní celkových rozdielov medzi stanoviskami s ohľadom na polohu v rámci ekotonu hornej hranice lesa je možné vidieť, že letokruhy stromov zo stanovísk na hranici lesa sú v porovnaní s letokruhmi rovnakého kambiálneho veku pochádzajúcimi zo stromových skupiniek širšie.

Najstaršie stromy (41-60, 61-80) majú mierne väčšie prírasty na juhozápadných svahoch v prípade stanovísk na hranici lesa. Mladšie stromy na hranici lesa neukazujú jednoznačné rozdiely, obdobia zníženého a zvýšeného prírastu sa medzi stanoviskami striedajú. Lokality v stromových skupinkách sa vyznačujú mierne väčším radiálnym prírastom 21-40 ročných stromov na severovýchodne orientovaných svahoch, v ostatných vekových triedach nie sú zjavné rozdiely medzi juhozápadne a severovýchodne orientovanými stanoviskami.

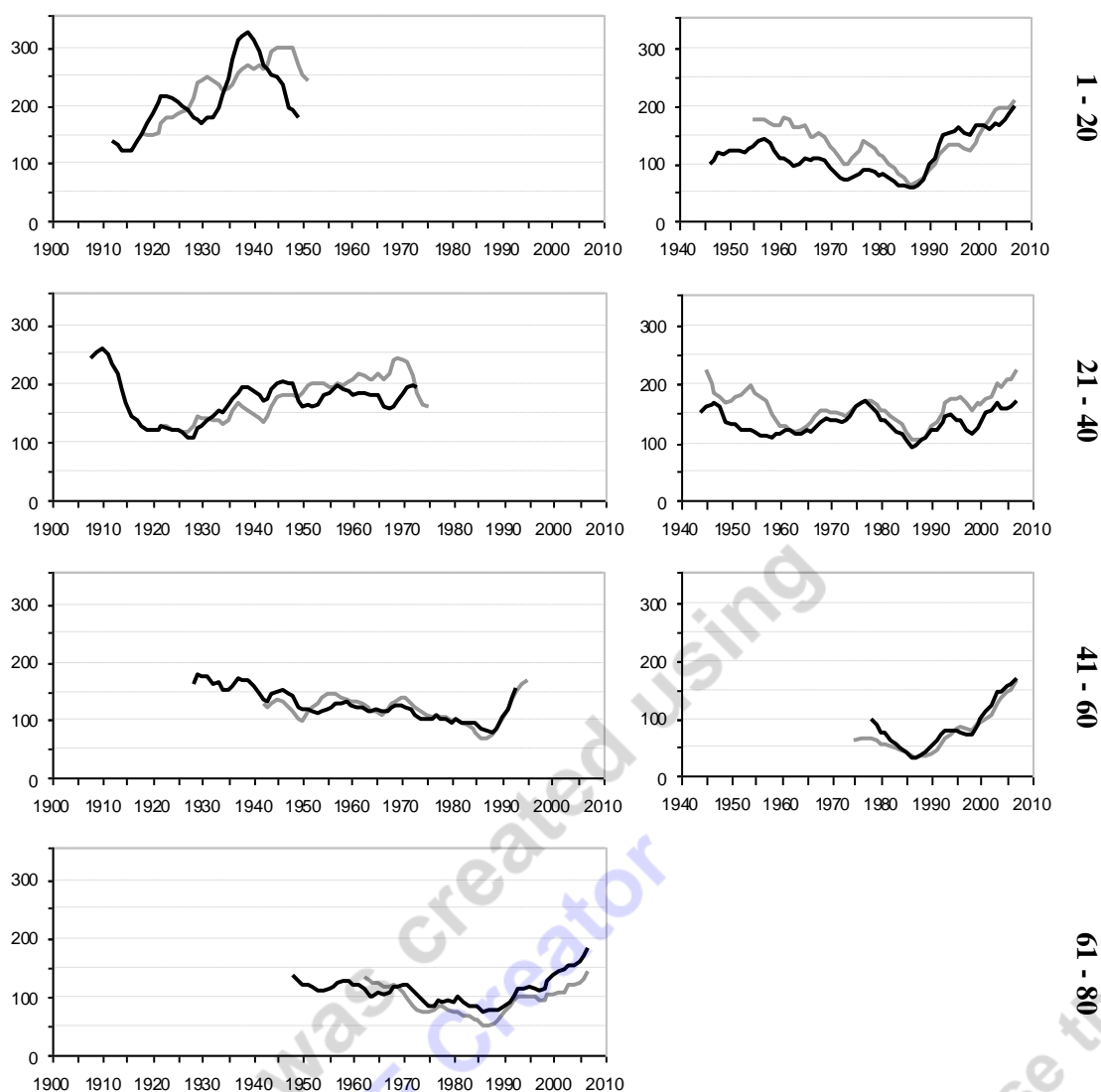
Rastová depresia 70. a 80. rokov má pri starších stromoch mierny priebeh, naopak mladé stromy v stromových skupinkách sa vyznačujú obzvlášť výraznou reakciou na nepriaznivé podmienky v tomto období. Tento jav ale nie je možné porovnať s priebehom kriviek letokruhov najmladších stromov na hranici lesa z dôvodu nedostatočného zastúpenia 1-20 (21-40) ročných stromov po roku 1950 (1970).

Na konci obdobia zvýšeného prírastu (začínajúceho v 90. rokoch), približne v rokoch 2000-2007, je dosiahnutá maximálna šírka letokruhov na všetkých študovaných stanoviskách vo všetkých kambiálnych vekových triedach (s výnimkou stanovísk, ktoré toto obdobie nezachycujú).

Obrázok 17: 5-ročné klzavé priemery letokruhov širok stromov podobného veku (kambiálne vekové triedy 1-20, 21-40, 41-60 a 61-80 rokov) zo stanovísk na hranici lesa a v skupinkách stromov. Čiernou farbou sú zobrazené stromy z juhozápadných svahov, šedou farbou stromy zo severovýchodných svahov.

**hranica lesa**

**skupinky**



V snahe o podrobnejšiu analýzu sú letokruhové krivky stromov z lokalít v stromových skupinkách rozdelené na skupinky 1 a skupinky 2 a zobrazené zvlášť pre obe polohy v rámci ekotonu hornej hranice lesa (obrázok 18).

Krivky nekorigovaných letokruhových širok dokumentujú na všetkých stanoviskách a vo všetkých kambiálnych vekových triedach spomalenie rastu a výraznú redukciiu šírky letokruhov koncom 70. a v 80. rokoch (s výnimkou najstarších stromov v skupinkách 1, z dôvodu príliš krátkeho rozpätia tejto triedy). Nasleduje postupné rozširovanie letokruhov od 90. rokov až do konca zaznamenaného obdobia, v poslednom zobrazenom roku 2007 je šírka letokruhov maximálna na všetkých stanoviskách skupiniek 1 aj skupiniek 2 vo všetkých vekových triedach.

Pri porovnávaní odlišností v raste stromov na juhozápadných a severovýchodných svahoch sa ukazuje, že rozdiely sú zrejmé najmä na lokalitách v skupinkách stromov 2, kde predovšetkým najmladšie stromy prirastajú výrazne

rýchlejšie na severovýchodných svahoch. Po roku 1990 neprevahuje tendencia rýchlejšieho rastu na výhodne ani na nevýhodne orientovaných svahoch.

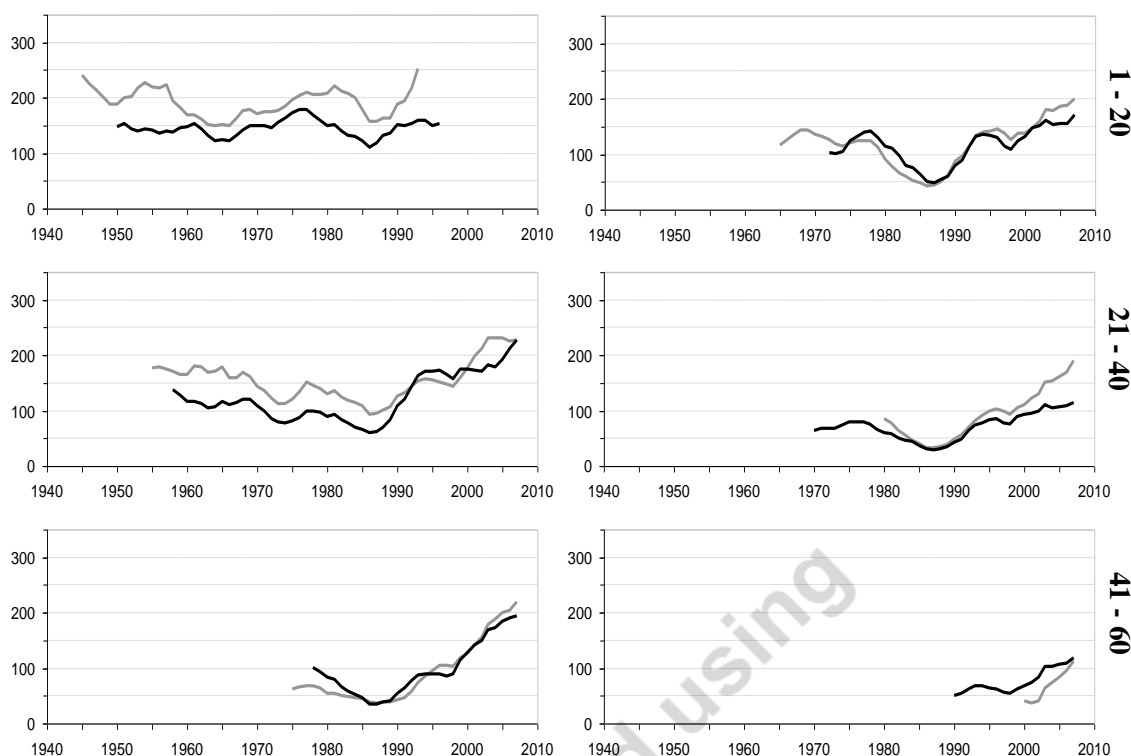
V stromových skupinkách 1 nie je možné jednoznačne určiť, kde je rast stromov rýchlejší. Mierne širšie letokruhy sú v triedach 1 až 20-ročných a 21 až 40-ročných stromov po roku 1990 zaznamenané na severovýchodných svahoch.

V najstaršom zachytenom veku (41-60 rokov) sú rozdiely v raste stromov na expozične opačných lokalitách na oboch typoch stanovišťa (skupinky 1, skupinky 2) iba minimálne, v najvyššie položených skupinkách prirastajú o niečo rýchlejšie stromy na výhodne juhozápadne orientovaných svahoch.

Obrázok 18: 5-ročné kĺzavé priemery letokruhov širokých stromov podobného veku (kambálne vekové triedy 1-20, 21-40 a 41-60 rokov) zo stanovišťa v stromových skupinkách 1 a stromových skupinkách 2. Čiernou farbou sú zobrazené stromy z juhozápadných svahov, šedou farbou stromy zo severovýchodných svahov.

**skupinky 2**

**skupinky 1**



### 5.6.2 DENDROMETRICKÉ CHARAKTERISTIKY STROMOV JEDNOTLIVÝCH STANOVÍSK

Jednotlivé dendrometrické charakteristiky boli zhodnotené a porovnané medzi odpovedajúcimi si lokalitami s rozličnou expozíciou pomocou jednosmernej analýzy rozptylu.

Porovnanie výšky stromov (tabuľka 8) ukazuje, že výška stromov je silno závislá na ich veku a na pozícií v rámci ekotonu hornej hranice lesa. Najväčšiu výšku dosahujú stromy na hranici lesa, kde je zároveň zaznamenaná aj najväčšia priemerná dĺžka čiastkových sérií. So zvyšujúcou sa nadmorskou výškou sa výška stromov znižuje (a zároveň sa znižuje priemerný vek stromov).

Na všetkých porovnávaných lokalitách dorastajú stromy na severovýchodných svahoch do väčšej výšky. Rozdiely vo výške stromov medzi severovýchodnými a juhozápadnými svahmi na základe analýzy ANOVA ale nie sú štatisticky významné ani na jednom zo stanovišok, preto zobrazené neboli.

Rozdiely v priemernom ročnom prírastku vetiev za posledných desať rokov ukázali, že podobne ako výška stromu, tak aj priemerná dĺžka praslenu je väčšia takmer vo všetkých prípadoch na severovýchodných svahoch (tabuľka x). Neplatí to pre



stanoviská na hranici lesa Vysokej Hole, kde väčšia priemerná dĺžka prasľenu je zistená na juhozápadnom svahu, podobne ako aj v prípade väčšej priemernej výšky stromov.

Z hľadiska štatistickej významnosti nie je rozdiel medzi stanoviskami významný, výsledky ANOVY nie sú zobrazené.

Pri porovnaní priemerného obvodu kmeňa v 1 m medzi stanoviskami na juhozápadnom svahu Praděda a severovýchodnom svahu Petrových kameňov bolo zistené, že väčší priemerný obvod kmeňa je na všetkých typoch stanovísk (hranica lesa, skupinky 2, skupinky 1) dosiahnutý na severovýchodných svahoch (tabuľka 8).

Tabuľka 8: Vybrané dendrometrické charakteristiky

| kód  | typ          | výška stromu (cm) | priemerný prírast vetiev za posledných 10 rokov (cm/rok) | obvod stromu vo výške 1m (cm) |
|------|--------------|-------------------|--|-------------------------------|
| pra3 | hranica lesa | 756               | 6,3  | 95                            |
| vhj3 |              | 782               | 6,0  | 113                           |
| pet3 |              | 777               | 6,9  | 109                           |
| vhs3 |              | 769               | 5,9  | 88                            |
| pra2 | skupinky 2   | 470               | 5,4  | 51                            |
| vhj2 |              | 586               | 6,0  | 54                            |
| pet2 |              | 526               | 5,8  | 73                            |
| vhs2 |              | 645               | 6,6  | 61                            |
| pra1 | skupinky 1   | 272               | 5,5  | 25                            |
| vhj1 |              | 306               | 5,3  | 39                            |
| pet1 |              | 286               | 5,6  | 38                            |
| vhs1 |              | 364               | 5,8  | 35                            |

Tabuľka 2: Základná štatistická charakteristika letokruhových chronológií

| kód stanoviška | typ stanoviška | orientácia | počet sérií | počiatok chronológie* | priemerná šírka letokruhov (mm) | priemerná dĺžka čiastkových sérií (roky) | priemerný počet chýbajúcich letokruhov na strom |
|----------------|----------------|------------|-------------|-----------------------|---------------------------------|--|---|
| pra3           | hranica lesa   | JZ         | 17          | 1841(1909)            | 1,222                           | 95                                       | 0   |
| vhj3           |                | JZ         | 16          | 1851 (1892)           | 1,936                           | 96                                       | 0,13  |
| pet3           |                | SV         | 15          | 1896 (1918)           | 1,703                           | 87                                       | 0,07  |
| vhs3           |                | SV         | 18          | 1844 (1915)           | 1,498                           | 82                                       | 0,06  |
| pra2           | skupinky 2     | JZ         | 18          | 1921 (1950)           | 1,350                           | 49                                       | 0,17  |
| vhj2           |                | JZ         | 19          | 1931 (1957)           | 1,808                           | 45                                       | 0,11  |
| pet2           |                | SV         | 16          | 1901 (1940)           | 1,423                           | 60                                       | 0,13  |
| vhs2           |                | SV         | 18          | 1920 (1960)           | 1,810                           | 43                                       | 0,06  |
| pra1           | skupinky 1     | JZ         | 21          | 1915 (1980)           | 1,131                           | 23                                       | 0,05  |
| vhj1           |                | JZ         | 15          | 1910 (1955)           | 0,787                           | 47                                       | 0,13  |
| pet1           |                | SV         | 15          | 1919 (1964)           | 0,852                           | 43                                       | 0,13  |
| vhs1           |                | SV         | 13          | 1965 (1982)           | 1,640                           | 29                                       | 0,23  |
| priemer        |                |            | 17          |                       | 1,430                           | 58                                       | 0,11  |

\* v zátvorke je uvedený počiatkový rok chronológie po jej orezaní (<5 čiastkových sérií)

\*\* priemerná medzisériová korelácia

\*\*\* vyjadrený populačný signál

## 6. DISKUSIA

### *Trendy rastu*

Pri porovnaní celkových rozdielov medzi stanoviskami s ohľadom na polohu v rámci ekotonu hornej hranice lesa je možné vidieť, že letokruhy stromov zo stanovísk v stromových skupinkách sú v porovnaní s letokruhmi rovnakého kambiálneho veku, pochádzajúcimi z hranice lesa všeobecne užšie, čo zodpovedá očakávanému zmenšovaniu letokruhového prírastu v smere stúpajúcej nadmorskej výšky.

Hlavným rozdielom v charakteristike rastu stromov na expozične opačných svahoch na hranici lesa je mierne vyšší prírast starších stromov na juhozápadných svahoch. Mladšie stromy na hranici lesa neukazujú jednoznačné rozdiely, obdobia zníženého a zvýšeného radiálneho prírastu sa medzi stanoviskami s rozličnou expozíciou striedajú. Lokality v stromových skupinkách sa do 90. rokov naopak vyznačujú väčším radiálnym prírastom mladých stromov na severovýchodne orientovaných svahoch, po roku 1990 rozdiely medzi veľkosťou prírastu nie sú jednoznačné.

K podobným výsledkom dospela vo svojej práci zaoberajúcej sa rastom stromov na svahoch s rozličnou expozíciou aj Ponocná (2009), ktorá zaznamenala, že nameraným vyšším teplotám pôdy (v koreňovej zóne) a vzduchu (pri vzrastovom vrchole) na južných svahoch Krkonôš na hranici lesa odpovedá aj zvýšený radiálny prírast stromov a naopak, v stromových skupinkách boli vyššie teploty vzduchu aj pôdy a súčasne aj väčšia šírka letokruhov zaregistrované na nevýhodne severne orientovaných stanoviskách.

Väčší radiálny prírast v stromových skupinkách zaznamenal na severných svahoch Krkonôš aj Píro (2011), rozdiely medzi rastom stromov na hranici lesa ukázali len nepatrne v prospech južných svahov.

Expozičným efektom v ekotone hornej hranice lesa vo Vysokých Sudetoch sa zaoberali Treml a Banaš (2008). Na základe svojho výskumu objavili iba pomerne slabý expozičný efekt prejavujúci sa v teplote pôdy a vzduchu, o niečo priaznivejšie sa ale ukázali teploty na južných svahoch na okraji zapojeného lesa, čo tiež odpovedá zvýšenému prírastu stromov z hranice lesa na výhodne orientovaných svahoch, zistenému v tejto práci.

Rossi a kol. (2007) na základe sledovania tvorby a delenia xylémových buniek ihličnanov na hornej hranici lesa vo východných Alpách zistili, že kambiálna aktivita

začína bez ohľadu na druh stromu skôr na južne orientovaných svahoch, kde aj neskôr končí, čo môže vysvetľovať väčší prírast starších stromov na výhodných juhozápadných svahoch, zaznamenaný v tejto práci.

Lokality v stromových skupinkách sa ale naopak vyznačujú pomerne výrazne pomalším prirastaním mladých stromov na juhozápadne orientovaných svahoch. Tento výsledok je čiastočne v rozpore s predpokladom, že mladé (nízke) stromy na výhodne orientovaných svahoch mimo zapojeného lesa majú v ekotone hornej hranice lesa väčší prospech zo slnečného zahrievania pripovrchových vrstiev vzduchu, v porovnaní so stromami so severnou expozíciou (Paulsen a Körner, 2001; Tremml a Banaš, 2008). Príčinu je možné pripísať vysokej citlivosti mladých stromov na sucho a zimné vysušenie (Tranquillini, 1979; Banaš a kol., 2001; Oberhuber, 2004), ktoré sa môže výraznejšie prejavovať práve na južných svahoch.

Nečakaná tendencia bola zistená pri porovnávaní odlišností v raste stromov na juhozápadných a severovýchodných svahoch stromových skupiniek (medzi skupinkami 1 a skupinkami 2), kedy sa ukázalo, že mladé stromy v nižšie položených stromových skupinkách (skupinky 2) prirastajú výrazne rýchlejšie na severovýchodných svahoch. Naproti tomu, v najvyššie lokalizovaných skupinkách 1 nie je rozdiel v rýchlosti rastu medzi expozične opačnými lokalitami významný.

Potenciálnou príčinou môže byť vplyv vetra. Ten sa prejavuje najmä v najvyšších, nechránených polohách ekotonu hornej hranice lesa, kde intenzívne vzduchové prúdenie obmedzuje ohriatie povrchovej vrstvy vzduchu, tvoriacej sa predovšetkým vo výhodnej južnej expozícií (Geiger, 1950; Jeník, 1961). Silné vzduchové prúdenie teda vyrovnáva teploty vzduchu blízko rastových vrcholov medzi rozlične orientovanými svahmi, čo spôsobuje oslabenie expozičného efektu (Tremml a Banaš, 2008).

Najvýraznejšou zaznamenanou rastovou depresiou je depresia v 70. a 80. rokoch, prejavujúca sa ako v lokalitách na hranici lesa, tak aj v stromových skupinkách v oboch polohách v rámci ekotonu hornej hranice lesa. Redukcia letokruhov je zapríčinená spolupôsobením niekoľkých faktorov. Pravdepodobne najvýznamnejším z nich je znečistenie kyslou depozíciou  $\text{SO}_2$ . Zároveň je možné pozorovať v tomto období zníženie priemernej teploty vo vegetačnej sezóne (V-VIII). Rastová depresia v 70. a 80. rokoch bola v Českej Republike pozorovaná aj v Krkonošiach (Sander a kol., 1995, Tremml 2007, Janda 2008, Ponocná 2009, Píro 2011), Krušných horách (Kroupová, 2002), Orlických horách (Rybníček a kol., 2009) a Beskydách (Čermák, 2010). Rastová

depresia zaznamenaná v tejto práci má pri starších stromoch miernejší, ale dlhší priebeh. Mladé stromy v stromových skupinkách sa naopak vyznačujú výraznou reakciou v tomto období, zároveň ale prejavy nepriaznivých podmienok (redukovaná šírka letokruhov) doznievajú u mladých stromov skôr.

Emisie síry priamo poškodzujú ihlice stromov a spôsobujú okysľovanie pôd spojené s ochudobnením o vápnik a horčík (Hruška a Oulehle, 2008). Väčšia celková plocha ihlíc u starších a väčších jedincov môže spôsobiť zachytenie väčšieho množstva škodlivých zlúčenín síry a následne výraznejšie okyslenie pôd a teda dlhodobo zhoršené rastové podmienky prejavujúce sa v redukovanej šírke letokruhov (Hruška a Oulehle, 2008). Kratšie trvanie rastovej depresie u mladých stromov je spôsobené menšou celkovou plochou ihlíc - mladé stromy akumulujú menej škodlivín a sú vitálnejšie, čomu odpovedá aj ich rýchlejšia regenerácia v období postupného doznievania imisiej kalamity (Hruška a Oulehle, 2008).

K výraznému zvyšovaniu radiálnych prírastov dochádza na študovaných lokalitách od začiatku 90. rokov, perióda zvýšeného rastu pokračuje až do súčasnosti. Súbežne so zväčšovaním šírky letokruhu je možné pozorovať aj trend stúpajúcej teploty. V závere obdobia zvýšeného prírastu, v rokoch 2000-2007, je dosiahnutá maximálna šírka letokruhov na všetkých študovaných stanoviskách vo všetkých kambiálnych vekových triedach (niektoré stanoviská toto obdobie nezahŕňajú).

Zvýšenie radiálneho prírastu bolo zaznamenané v mnohých pohoriach strednej Európy (napr. Rolland a kol., 1998; Paulsen a kol., 2000; Buntgen a kol., 2007; Buntgen a kol., 2008; Vittoz a kol., 2008; Buntgen a kol., 2010) Pravdepodobnými príčinami pomerne prudkého zrýchlenia rastu stromov sú zvyšujúce sa teploty vzduchu vo vegetačnej sezóne na jednej strane a stúpajúce dusíkové vstupy v lesných ekosystémoch na strane druhej (Zapletal, 1997).

#### *Reziduálne chronológie*

Priebeh letokruhových chronológií sa medzi stanoviskami výrazne nelíši a odhaľuje podobné trendy v priebehu letokruhových indexov ako na stanoviskách v lese, tak aj v prípade stanovísk v stromových skupinkách (skupinky 1 aj 2).

O kvalite a replikovateľnosti vytvorených chronológií hovorí pomerne vysoká hodnota celkového vyjadreného populačného signálu (EPS), ktorá prekračuje kritickú hodnotu stanovenú Wigleym (1984) na všetkých stanoviskách. Je však potrebné vziať do úvahy, že výpočet hodnoty EPS vychádza nielen z hodnôt priemerných

medzisériových korelácií ale tiež z počtu čiastkových sérií tvoriacich výslednú chronológiu, čo môže mierne skresliť hodnotenie porovnávanie kvality chronológií.

Miera medziročnej premenlivosti v šírke letokruhu (priemerná citlivosť) dosahuje pomerne vysoké hodnoty predovšetkým v lokalitách stromových skupiniek 1, čo ukazuje na pomerne vysokú premenlivosť letokruhov. Podľa Fergusonovej klasifikácie sa za vysokú považuje priemerná hodnota citlivosti vyššia ako 0,33 (Shiyatov, 1986), túto hodnotu presahujú všetky stanoviská najvyššie položených skupiniek. Zistený výsledok sa zhoduje so všeobecným predpokladom známym poznatkom, že najvyššie rastúce stromy, ktoré sú blízko svojho limitu rozšírenia, reagujú na zmeny environmentálnych faktorov najcitlivejšie.

#### *Odozva na teploty*

Reziduálne chronológie stanovísk z hranice lesa ukázali pozitívny vzťah stromov predovšetkým s priemernými teplotami vo vegetačnej sezóne (máj, jún, júl, august a rôzne kombinácie období po sebe nasledujúcich mesiacov). Pozitívnu odozvu stromov na teploty v máji až auguste zistili v Alpách rovnako aj Vittoz a kol. (2008) a Frank a Esper (2005). Avšak Büntgen a kol. (2006) zistil pozitívnu odozvu alpských stromov iba na teploty mája až júla, ale nie na augustové teploty. Priemerné teploty augusta sa tiež neukázali ako významné v Tatrách (Savva a kol., 2006; Büntgen a kol., 2007), ani v Krkonošiach (Sander a kol., 1995; Píro, 2011). Büntgen a kol. (2007) dáva tento výsledok v Tatrách do súvislosti s prevládajúcimi chladnejšími a suchšími klimatickými podmienkami počas prechodu neskorého leta do jesene.

Produkcia buniek skorého dreva, ktoré sa väčšinou najvýraznejšie podieľa na celkovej šírke letokruhu (Büntgen, 2007), začína v prípade smreku v apríli až máji, následne v júni a v júli je tvorba buniek najvýraznejšia. Tvorba buniek neskorého dreva sa objavuje v júli a v auguste, môže sa predĺžiť až do septembra (Schweingruber, 1996; Rossi a kol., 2006).

Výsledok tejto práce teda naznačuje, že kambiálna aktivita v Hrubom Jeseníku ovplyvňuje šírku letokruhov ešte v priebehu augusta.

Stanovisko vyh3 koreluje pozitívne aj s aprílovou teplotou aktuálneho roku. Pozitívny vplyv teplôt v tomto období bol pozorovaný aj v nižšie položených lokalitách v Slezských Beskydách (Rybníček a kol., 2009) a v podobných nadmorských výškach v Krkonošiach (Píro, 2011). V tomto období sa u smreku oživuje fotosyntetická aktivita, pričom vyššie teploty zabezpečia lepšie podmienky pre toto oživenie (napr. rýchlejšie



topenie pôdy), vyššia priemerná teplota tiež môže znamenať nižšiu pravdepodobnosť nočných mrazov a z toho vyplývajúce poškodenie (Rybníček a kol., 2009).

Pozitívnu odozvu stromov z nižších polôh na teplú včasnú jar pozorovali v Tatrách aj Savva a kol. (2006) a v Alpách Oberhuber (2004).

Na južných svahoch hranice lesa bola v Hrubom Jeseníku pozorovaná mierne výraznejšia odozva v raste stromov na májové a júnové teploty v porovnaní so severnými svahmi. Dôvodom môže byť dlhšie trvanie snehovej pokrývky na severných svahoch a možné výraznejšie negatívne teplotné extrémny, ktoré nie sú vyjadrené v teplotnom priemere.

Odlišnosť medzi lokalitami na hranici lesa a v stromových skupinkách 2 sa prejavuje v posune najsilnejších vzťahov s priemernými teplotami z jednotlivých mesiacov máj, jún, júl a august na hranici lesa na mesiace júl a august v stromových skupinkách 2. Výškový posun v zákonitostiach vzťahu radiálneho rastu stromov a priemerných mesačných teplôt zaznamenali v Tatrách aj Savva a kol. (2006), ktorý tento posun spájajú so skracujúcou sa dĺžkou vegetačnej sezóny. Oneskorenie nástupu rastovej sezóny smrekovca opadavého (*Larix decidua*) so stúpajúcou nadmorskou výškou pozoroval v Alpách aj Moser (2010).

Komplementárne lokality Vysokej Hole v stromových skupinkách 2 negatívne korelujú s priemernou májovou teplotou predchádzajúceho roku. Podobný výsledok zaznamenal aj Píro (2011), ktorý ho odôvodňuje tvrdením Čermáka (2007), že vysoké teploty predchádzajúceho roku môžu spôsobiť vlhkostný deficit, ktorý ovplyvní dostupnosť vody v nasledujúcom jarnom období, čo sa výrazne môže prejavovať najmä nad hranicou zapojeného lesa.

Na stanoviskách stromových skupiniek 1 je možné pozorovať pokračovanie trendu v posune silnejšieho vzťahu s jednotlivými mesiacmi máj, jún, júl a august na hranici lesa na mesiace júl a august v stromových skupinkách, súvisiaci s dĺžkou vegetačnej sezóny (Savva a kol., 2006; Moser, 2010).

Juhozápadne orientované stanoviská pral a vhl korelujú významne aj s júnovou priemernou teplotou, naopak s júlovou priemernou teplotou viac korelujú severovýchodne orientované stanoviská. Vysvetlenie je opäť možné vidieť v posune nástupu vegetačnej sezóny, ktorá na výhodne orientovaných juhozápadných svahoch v najvyšších polohách Hrubého Jeseníku pravdepodobne začína skôr. V rozpore s týmto tvrdením je ale zistenie Mosera (2010), ktorý expozičný efekt na nástup rastovej sezóny v Alpách nezaznamenal.

Lokality v stromových skupinkách 1 pozitívne korelujú aj s priemernou januárovou teplotou, severovýchodne orientované stanoviská ukazujú silnú pozitívnu závislosť aj na teplotách vo februári a v marci. Vyššie teploty včasnej jari ovplyvňujú topenie snehu predovšetkým na severne orientovaných svahoch, čo môže prispieť k predĺženiu rastovej sezóny (Oberhuber, 2004).

Limitácia rastu sa zvyšuje s nadmorskou výškou a teda chronológia zo stanovísk v stromových skupinkách by mali ukazovať vyššie korelácie s teplotnými priemerami (Frank a Esper, 2005). Rozdiel medzi korelačnými koeficientmi (korelácií s priemernými teplotami) medzi stanoviskami z hranice lesa a zo stromových skupiniek 2 ale v tejto práci nie je viditeľný, korelácie zo stromových skupiniek 1 nie je možné porovnávať, z dôvodu príliš krátkeho korelovaného obdobia. Nevýrazné rozdiely vo vzťahu k teplotám je možné pripísať mladému veku stromov zo stromových skupiniek, ktoré sú výrazne citlivé na environmentálny stres (napr. pôsobenie vetra, snehu, teplotné extrémny), ktoré nie sú dobre reprezentované v teplotných priemeroch. Podobne aj Vittoz a kol. (2008) zaznamenal v Alpách menej významné korelácie nad hranicou lesa v porovnaní so stanoviskami lese.

## 7. ZÁVER

Práca sa zaoberala rozdielmi v raste smreku v ekotone hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku, s dôrazom na vplyv expozície svahu a pozície v rámci ekotonu.

Porovnanie trendov v radiálnom raste stromov medzi jednotlivými lokalitami ukázalo, že stromy z juhozápadných svahov na hranici lesa sa vyznačujú mierne širšími letokruhmi, v porovnaní so stromami zo severovýchodných svahov. Mladšie stromy neukázali expozične podmienené rozdiely v raste, pravdepodobne v dôsledku väčšej náchylnosti na environmentálny stres.

V stromových skupinkách strednej časti ekotonu hornej hranice lesa boli väčšie prírasty zaznamenané na severovýchodne orientovaných svahoch, pri stromoch v lokalitách najvyššie položených stromových skupiniek sa expozičný efekt neprejavil. Pravdepodobnou príčinou je silné vzdušné prúdenie, charakteristické pre lokality v blízkosti vrcholových oblastí.

Od druhej polovice 70. rokov do druhej polovice 80. rokov sa nezávisle od polohy vnútri ekotonu alebo od expozície voči slnečnému žiareniu na všetkých stanoviskách prejavila rastová depresia. Najdôležitejšou príčinou obmedzenia rastu v tomto období bol stres v dôsledku kyslých zrážok v spolupôsobení so zníženou teplotou vo vegetačnom období. Rastová depresia sa najvýraznejšie prejavila v najvyššie položených lokalitách, kde sú stromy najmladšie a preto najcitlivejšie (

V súčasnom období je v študovanom území zaznamenaný najväčší nárast radiálnych prírastov v celom sledovanom období, vo všetkých vekových triedach stromov. Pravdepodobnými príčinami sú stúpajúce teploty vzduchu vegetačnej doby spolu so stúpajúcimi dusíkovými vstupmi.

Predpoklad, že čím stromy rastú bližšie k svojej teplotnej hranici rastu, tým bude ich odozva na teploty výraznejšia, sa v tejto práci potvrdil iba čiastočne. Vzťah stromov zo stromových skupiniek v strednej časti ekotonu k teplotám nie je výraznejší ako vzťah stromov z hranice lesa. Dôvodom je pravdepodobne častejší výskyt extrémnych udalostí v oblasti stromových skupiniek, ktoré nie sú dobre zaznamenané v priemernej teplote. Na druhej strane, stromy rastúce v najvyššej časti ekotonu reagovali na priemerné teploty najvýraznejšie. Je však možné, že výsledok analýzy je v prípade najvyššie položených stromových skupiniek skreslený príliš krátkym rozsahom korelovaného obdobia.

Rast stromov bol pozitívne ovplyvnený predovšetkým priemernou teplotou kombinácií mesiacov vegetačnej doby (V-VII, V-VIII, VI-VII) a jednotlivými mesiacmi vegetačnej doby (V, VI, VII, VIII).

So stúpajúcou nadmorskou výškou sa prejavil posun najsilnejších vzťahov k teplotám z mesiacov máj – august na hranici lesa na mesiace jún – august v stromových skupinkách, čo naznačuje oneskorenie nástupu vegetačnej doby so stúpajúcou nadmorskou výškou.

V najnižšie položených lokalitách ekotonu (na hranici lesa) má na odozvu rastu stromov vplyv aj expozícia svahu, prejavuje sa skorším začiatkom rastovej sezóny na

juhozápadne orientovaných stanoviskách, podporenej výraznejším vzťahom s júnovými a júlovými teplotami v porovnaní so severovýchodnými svahmi.

Stromy z najvyššie položených lokalít korelujú pozitívne s priemernou januárovou teplotou, severovýchodne orientované stanoviská ukazujú silnú pozitívnu závislosť aj na teplotách vo februári a v marci. To naznačuje, že vyššie teploty včasnej jari ovplyvňujú topenie snehu predovšetkým na severne orientovaných svahoch, čo môže prispieť k predĺženiu rastovej sezóny.

Z čiastočných záverov je možné usúdiť, že na rast stromov v ekotone hornej hranice lesa Hrubého Jeseníku má vplyv ich pozícia vnútri ekotonu. Expozičný efekt sa čiastočne prejavuje v zapojenom lese, v stromových skupinkách nie je jednoznačný.

## 8. POUŽITÁ LITERATÚRA

- ALBLOVÁ, B. (1970): Die Wald und Baumgrenze im Gebirge Hruby Jeseník (Hohes Gesenke), Tschechoslowakei Folia Geobotanica & Phytotaxonomica, 5:1, s. 1-42.
- ARMAND, A.D. (1992): Sharp and gradual mountain timberlines as a result of species interaction. In: Hansen, A.J. and Di Castri, F.: Landscape boundaries, consequences for biotic diversity and ecological flows. Ecological Studies, Springer, s. 360-378.
- BANAŠ, M., TREML, V., LEKEŠ, V., KURAS, T. (2001): Několik poznámek ke stanovení alpské hranice lesa ve Východních Sudetech. In: Létal A., Szczyrba Z. & Vysoudil M. [eds.], Sborník příspěvků výroční konference České geografické společnosti „Česká geografie v období rozvoje informačních technologií“, 25.–27.9.2001, s. 109–128, Univerzita Palackého, Olomouc.
- BATLLORI, E.- GUTIÉRREZ, E. (2008): Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees. Journal of Ecology 96, s. 1275-1288.
- BOX, G. E. P., JENKINS, G. M. (1976): Time series analysis: forecasting and control. San Francisco, CA: Holden-Day. (1970). University of Wisconsin. Madison. WI and University of Lancaster, England, 575 s.
- BRIFFA, K.R., SCHWEINGRUBER, F.H., JONES, P.D., OSBORN, T.J.et (1998) Phil.Trans. R. Soc. Lond. B, 353, s. 65 – 73.
- BÜNTGEN, U., FRANK, D.C., SCHMIDHALTER, M., NEUWIRTH, B., SEIFERT, M. AND ESPER, J. (2006): Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. Trees, 20: s. 99-110.
- BÜNTGEN, U., FRANK, D.C., KACZKA, R., VERSTEGE, A., ZWIJACK-KOZICA, T. AND ESPER, J. (2007): Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. Tree Physiology, 27: s. 689-702.
- BÜNTGEN, U., FRANK, D.C., WILSON, R., CARRER, M., URBINATI, C. AND ESPER, J. (2008): Testing for tree-ring divergence in the European Alps. Global Change Biology, 14: s. 2443-2453.
- BÜNTGEN, U., FRANK, D., TROUET, V. AND ESPER J. (2010): Diverse climate sensitivity of Mediterranean tree-ring width and density. Trees, Structure and Function, 24: s. 261-273.
- BUREŠ, L. (1976): Byly nebo budou hřebeny Jeseníků zalesněny? Živa, ročník 24, s. 202 – 204.

- ČERMÁK, P. (2007): Defoliace a radiální růst jako ukazatele vitality smrku ztepilého. Lesnická práce, 86, 11, s. 14-15.
- ČERMÁK, P., RYBNÍČEK, M., ŽID, T. KOLÁŘ, T. BOČKOVÁ, H., PŘEMYSLOVSKÁ, E. (2010): The effects of climatic factors on radial growth of Norway spruce *Picea abies* in the Silesian Beskids. Beskydy, 3, 1, s. 9-18.
- DEMEK, J. (1973): Současné geomorfologické pochody v Hrubém Jeseníku. Campanula 4, s. 103 – 108.
- COOK, E., R. (1985): A time series analysis approach to tree ring standardization. Dissertation at Graduate College, University of Arizona, Tucson, 171 s.
- COOK, E. R. AND PETERS, K. (1997): Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. The Holocene, 7: s. 361-370.
- COOK, E.R., BRIFFA, K.R., SHIYATOV, S.G. AND MAZEPA, V.S. (1990): Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In E.R. Cook and L.A. Kairiukstis: Methods of Dendrochronology. Kluwer, Dordrecht, s. 104-123.
- DEYLOVÁ-SKOČDOPOLOVÁ (1984): Horní hranice lesa v Hrubém Jeseníku. Campanula 6, s. 5 – 14.
- DULLINGER, S. et al. (2005): Interactions among tree line conifers: differential effects of pine on spruce and larch. Journal of Ecology, 93, 5, s. 948-957.
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer, Stuttgart, 1095 s.
- ESPER, J., COOK, E.R., KRUSIG, P.J. AND PETERS, K. (2003): Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. Tree-Ring Research, 59: s. 81-93.
- FAJARADO, A., PIPER, F., CAVIERES, I., LOHENGRIN, A. (2011): Distinguishing local from global climate influences in the variation of carbon status with altitude in a tree line species. Global ecology and biogeography, s. 307 – 318.
- FRANK, D. AND EESPER, J. (2005): Temperature reconstructions and comparisons with instrumental data from a tree-ring network for the European Alps. International Journal of Climatology, 25: s. 1437-1454.
- FRITTS, H.C. (1976): Tree rings and climate. Academic Press, London, 567 s.
- GEIGER, R. (1950): Climate near the ground. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 518 s.
- GRACE, J., BERNINGER, F. & NAGY, L. (2002) Impacts of climate change on the tree line. Annals of Botany, 90, 537–544.



- HEIKKINEN, O., OBREBSKA-STARKEL, B., TUHKANEN, S. (1995): Introduction: The timberline – a changing battlefront. In: Heikkinen, O., Obrebska-Starkel, B., Tuhkanen, S: Environmental aspects of the timberline in Finland and in the Polish Carpathians. Uniwersytet Jagielloński, Kraków, s. 7-16.
- HELAMA, S., LINDHOLM, M., TIMONEN, M., MERILAINEN, J., ERONEN, M. (2004): The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 2, interannual to centennial variability in summer temperatures for 7500 years. *The Holocene* 12: s. 681-687.
- HOCH, G., POPP, M., KÖRNER, CH. (2002): Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus Cembra* suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. *Oikos*, 98, s. 361-374.
- HOLTMEIER, F.-K. (2000) Die Höhengrenze der Gebirgswälder. *Arbeiten aus dem Institut für Landschaftsökologie* 8, Münster.
- HOLTMEIER, F.-K. (2003): Mountain timberlines - ecology, patchiness, and dynamics. *Advances in Global Change Research*, 14, 369. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- HOLTMEIER, F.-K. (2009): Mountain timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. *Advances in global change research*. 36. Springer Netherlands, 437 str.
- HOŠEK, E. (1973): Zalesňování horských holí na Králickém Sněžníku a Keprníku kolem r. 1900. *Čas. Slez. Muz. (C)* 3: s. 65–73.
- HRUŠKA J., OULEHLE F. (2008): Dusík v lesních ekosystémech. *Vesmír*, 87, 12, s. 866-869.
- CHLUPÁČ, I., BRZOBOHATÝ, R., KOVANDA, J., STRÁNÍK, J. (2002): Geologická minulost České republiky. Praha: Academia, 436 s.
- JANDA, M. (2008): Letokruhová chronologie smrku pro Východní Krkonoše. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 72 s.
- JENÍK, J. (1961): Alpínská vegetace Krkonoš, Kralického Sněžníku a Hrubého Jeseníku. *Teorie anemo-orografických systémů*. Nakladatelství ČSAV, Praha. 412 s.
- JENÍK, J. (1973): Alpínské ekosystémy a hranice lesa v Hrubém Jeseníku z hlediska ochrany přírody. *Campanula* 4: s.35–42.
- JENÍK, J., LOKVENC, T. (1962): Die alpine Waldgrenze im Krkonoše Gebirge. *Rozpravy Československé akademie věd*, 72, sešit 1, Nakladatelství ČSAV, Praha, 65 s.
- JOLLIFFE, I.T., (2002): *Principal Component Analysis*, second edition, New York: Springer-Verlag New York, Inc.

- KALUS, J., VAŘECHA, A. (1972): Čistota vôd Hrubého Jeseníku. *Campanula* 3, s. 23 – 44.
- KAVALEC, K. (1982): Státní přírodní rezervace Petrovy kameny. Inventariační průzkum lesnický dle metodiky SÚPPOP 1973. Krajské středisko státní památkové péče a ochrany přírody v Ostravě.
- KNIBBE, B. (2004): PAST 4. Brunn, SCIEM.
- KNIBBE, B. (2007): Personal Analysis System for Treering Research – Instruction Manual. SCIEM.
- KÖRNER, C. (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115, s. 445–459.
- KÖRNER, CH. (1999): Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystem. New York: Springer. 290 s.
- KÖRNER, CH. (2003): Alpine plant life. Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2nd Edition. Springer. 344 str.
- KÖRNER, CH. (2007): Climatic treelines: conventions, global patterns, causes. In: *Erdkunde*, 61, s. 316-324.
- KÖRNER, CH., PAULSEN, J. (2004): A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31, 5, s. 713-732.
- KROUPOVÁ, M. (2002): Dendroecological study of spruce growth in regions under long-term air pollution load. *Journal of Forest Science*, 48: 536-548.
- KUNSKÝ, J. (1967): Fyzický zeměpis Československa. Praha: SPN, 537 s.
- KYNCL, T., KYNCL, J. (2002): Principy dendrochronologie. *Živa*, 6, s. 249-252.
- LEDNICKÝ, V. (1985): Podnebí Pradědu. Šumperk, Severní Morava, sv.49: 44–48.
- LEDNICKÝ, V. (1972a): Klimatické poměry Pradědu. *Campanula* 3: 53–60.
- LEDNICKÝ, V. (1972b): Větrné poměry na Pradědu. *Campanula* 3: 9–22.
- LEDNICKÝ, V., PIVOŇOVÁ, E., UJÁZY, F. (1973): Teplota vzduchu na Pradědu. *Campanula* 4: s. 175–202.
- MITCHELL, T.D., CARTER, T.R., JONES, P.D., HULME, M., NEW, M., 2003: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Journal of Climate*.
- MOSER, L., FONTI, P., BÜNTGEN, U., FRANZEN, J., ESPER, J., LUTERBACHER, J. AND FRANK, D. (2010): Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps. *Tree Physiology*, 30: 225-233.

- OBERHUBER, W. (2004): Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiology*, 24: 291-301.
- PAULSEN, J., WEBER, U. M. AND KÖRNER, CH. (2000): Tree growth near treeline: Abrupt or Gradual Reduction with Altitude? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32: 14-20.
- PAULSEN, J., KÖRNER, CH. (2001): GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggest to exposure effect. *Journal of Vegetation Science*, 12, s. 817-824.
- PÍRO, L. (2011): Dynamika horní hranice lesa v závislosti na expozici svahu, západní Krkonoše. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 62 s.
- PLESNÍK, P. (1971): Horná hranice lesa vo Vysokých a v Belanských Tatrách. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 240 str., 5 mapových príloh.
- PLESNÍK, P. (1984): Zvláštnosti hornej hranice lesa v Hrubom Jeseníku. *Campanula* 6: s. 67 – 78.
- PONOCNÁ, T. (2009): Ověření expozičního efektu na horní hranici lesa v Krkonoších. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 82 s.
- PROSOVÁ, M.: (1973): Zalednění Hrubého Jeseníku. *Campanula* 4, s.115 – 123.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Geografický ústav ČSAV. Brno. 82 s.
- ROLLAND, C., PETITCOLAS, V. AND MICHALET, R. (1998): Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750. *Trees*, 13: 40–53.
- ROSSI, S., DESLAURIERS, A. AND ANFODILLO, T. (2006): Assessment of cambial activity and xylogenesis by microsampling tree species: an example at the alpine timberline. *IAWA Journal*, 27: 383-394.
- ROSSI, S., DESLAURIERS, A., ANFODILLO, T., CARRARO, V. (2007): Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia*, 157,1, s.1-12.
- RYBNÍČEK, M., ČERMÁK, P., KOLÁŘ, T., PŘEMYSLOVSKÁ, E. AND ŽID, T. (2009): Influence of temperatures and precipitation on radial increment of Orlické hory Mts. spruce stands at altitudes over 800 m a.s.l. *Journal of Forest Science*, 55: 257-263.
- SANDER, C., ECKSTEIN, D., KYNCL, J. AND DOBRÝ, J. (1995): The growth of spruce (*Picea abies* (L) Karst) in the Krkonoše-(Giant) Mountains as indicated by ring width and wood density. *Annales des Sciences Forestières*, 52: 401-410.

- SAVVA, Y., OLEKSYN, J., REICH, P. B., TJOELKER, M. G., VAGANOV, E. A. AND MODRZYNSKI, J. (2006): Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees*, 20: s. 735 - 746.
- SCHWEINGRUBER, F.H. (1996): *Tree rings and environment*. Paul Haupt Bern, WSL Birmensdorf. 609 pp.
- SVEINBJÖRNSSON, B. (2000): North American and European Treelines: External Forces and Internal Processes Controlling position. *Ambio*, 29, 7, s. 388-395.
- TEJNSKÝ A TEJNSKÁ (1972): Klimatické poměry Pradědu. *Campanula* 3: s. 53-60.
- TER BRAAK, C.J.F., ŠMILAUER, P. (1998): *CANOCO Reference Manual and Users Guide to Canoco for Windows*. Software for Canonical Community Ordination (version 4). Centre of Biometry Wageningen (Wageningen, NL) and Microcomputer Power (Ithaca NY, USA), 112 s.
- TRANQUILLINI, W. (1979): *Physiological Ecology of the Alpine Timberline. Tree Existence at high Altitudes with Special Reference to the European Alps*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 131 s.
- TREML, V. (2007): *Dynamika alpinské hranice lesa ve Vysokých Sudetech*. Disertační práce, PříF UK, Praha, 190 s.
- TREML, V., BANAŠ, M. (2000): Alpine timberline in the High Sudetes. *ACTA UNIVERSITATIS CAROLINAE, GEOGRAPHICA*, Praha, 35, s. 83-99.
- TREML, V., BANAŠ, M. (2008): The effect of exposure on alpine treeline position: a case study from the High Sudetes, Czech Republic. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40, 4, s. 751-760.
- VITTOZ, P., RULENCE, B., FRELÉCHOUX, F. (2008): Effect of Climate and Land-Use Change on the Establishment and Growth of Cembra Pine (*Pinus Cembra* L.) over the Altitudinal Treeline Ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40, 1, s. 225-232.
- WIESER, G. (1997): Carbon dioxide gas exchange of cembra pine (*Pinus cembra*) at the alpine timberline during winter. *Tree physiology*, 17: 473-477.
- WIESER, G. (2007): Climate at the Upper Timberline. In: Wieser, G., Tausz, M. (eds.): *Trees at their upper limit*. Springer, Dordrecht, 233 s.
- WIGLEY, T.M.L., BRIFFA, K.R. AND JONES, P.D. (1984): On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23: s. 201-213.

ZEIDLER, M., BANAŠ, M., DUCHOSLAV, M., LEŠKOVÁ, M. (1997): Vliv vysazených klečových porostu na alpínskou vegetaci v Hrubém Jeseníku. Příroda, Praha, 29: s. 37-50.

ZAPLETAL, M. (1997): Atmosférická depozice síry a dusíku s ohledem na acidifikaci prostředí v České republice. In: Program a sborník konference Ovzduší '97, Luhačovice, 23.-26.3.1997 (editor Holoubková). Masarykova univerzita v Brně, s. 101-105.

This document was created using  
Smart PDF Creator  
To remove this message purchase the  
product at [www.SmartPDFCreator.com](http://www.SmartPDFCreator.com)